

## ПЕРВЫЕ

М. В. Сосипатров<sup>1</sup>

В статье «**Rotating plasma**», опубликованной в Журнале физики и инженерии поверхности, 2016, том 1, № 1, подробно описана встреча осенью 1965 года академика К. Д. Синельникова и инженера-конструктора физико-технического факультета Харьковского государственного университета Алима Михайловича Рожкова, определившая развитие перспективного научного направления на кафедре физики плазмы. Для создания новой лаборатории деканом факультета Г. А. Милютиним в распоряжение А. М. Рожкова были направлены три студента 5-го курса, среди которых выделялся Виктор Бителёв, отмеченный Алимом Михайловичем на лабораторных работах: способен в науках, быстро соображает, в меру инициативен, рукастый радиолобитель.

Виктору и был поручен завершающий монтаж, физический пуск, методические измерения на установке «Магнетрон Габора» для создания плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Устройство подробно описано ниже.

В. Бителёв, таким образом, стал первым сотрудником на кафедре, который рядом с А. М. Рожковым регулярно и последовательно осваивал технику создания «вращающейся» плазмы.

Дипломную работу Виктор под руководством А. М. Рожкова защитил в декабре 1967 года.

На предложение остаться и продолжить работу на кафедре он ответил вынужденным отказом — семейные обстоятельства обязывали возвращаться в родной Торжок Подмосковья: прибавление в семье, жильё от будущего работодателя, предприятия союзного МЭП.

В. И. Фареник к работам по упомянутой тематике был привлечен в начале 1968 года.

В. И. Фареник вспоминает: «Работать будешь здесь, на линзе Габора, Алим Михайлович завёл меня в «секретную» комнату с установкой. На вопрос о наработках диплома В. Бителёва ответ был краток, Разберётесь сами! «Сами» — это я, В. Фареник и дипломники того года Вячеслав Власов и Михаил Пикуль.

После замечания А. М. обратить внимание в килогерцовом частотном спектре вращающейся плазмы на колебания, по характеристикам похожим на циклотронную частоту ионов и ранее отмеченных, но не изучавшихся на этой установке, вопрос о наработках Виктора отпал. Группа авторитетов из УФТИ — Владимир Тарасович Толок, Виктор Афанасиевич Супруненко и Константин Николаевич Степанов ТРЕБОВАЛИ от нас с А. М. результатов по ионно-циклотронным колебаниям в нашей плазме. Нагрев ионной компоненты на собственных частотах ионов был центральным у термоядерщиков. В бортовом журнале установки, планшетах с графиками, оставшихся после Виктора, упоминался частотный диапазон в несколько десятков килогерц.»

Ранее перипетии развития исследований резонансной циклотронной неустойчивости во вращающейся плазме, на долгие годы ставшими основной научной тематикой лаборатории А. М. Рожкова, изложены подробно, приведём только для удобства читателей список первых публикаций тех лет.

Уже при подготовке материала к 80-летию со Дня рождения профессора А. М. Рожкова, нам подумалось, что славная анфилада публикаций из почти тысячи наименований экспериментальной школы физики плазмы Алима Михайловича, его учеников и соратников первого и второго поколений должна была бы иметь знаковое, заметное начало. А ответ мы искали, исходя из простого постулата: не могли способнейший студент физтеха Виктор Бителёв и талантливый физик-экспериментатор Алим Рожков сделать проходной, рядовой ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ! Даже в начале разработки новой тематики, даже среди поисков рабочих экспериментальных устройств для создания плазмы в скрещенных полях!

Искать дипломную работу!

<sup>1</sup>Заместитель Генерального директора, главный инженер ННЦ «ХФТИ», выпускник ФТФ 1972 г., один из ведущих сотрудников лаборатории профессора А. М. Рожкова в 70–90-х гг., в 1992–1995 гг. — заместитель директора НФТЦ МОН и НАН Украины.

Более года заняли поиски в архивах, кипах многолетней давности бумаг. И, как не редко бывает, искомый объект оказался почти под рукой почетного пенсионера, бывшего главного инженера крупного предприятия электронной промышленности Виктора Борисовича Бителёва. Среди инфарктов и прочих спутников нелёгкого трудового пути, в домашней кладовой был найден дипломный труд пятидесятилетнего возраста.

Младший Бителев проявил чудеса фотоискусства и владения эфиром интернета, а редакционная группа «физики и инженерии поверхности» привела к журнальным стандартам присланный материал, который мы имеем возможность представить ниже.

Приводим для идентификации материала ксероксную фотокопию титульной страницы дипломной работы В. Бителёва.

Далее следует точная копия текста этой работы, без правок стиля или «осовременивания».

Рисунки сделаны на основе соответствующих фотографий, осциллограммы скопированы с оригинального фотоматериала.

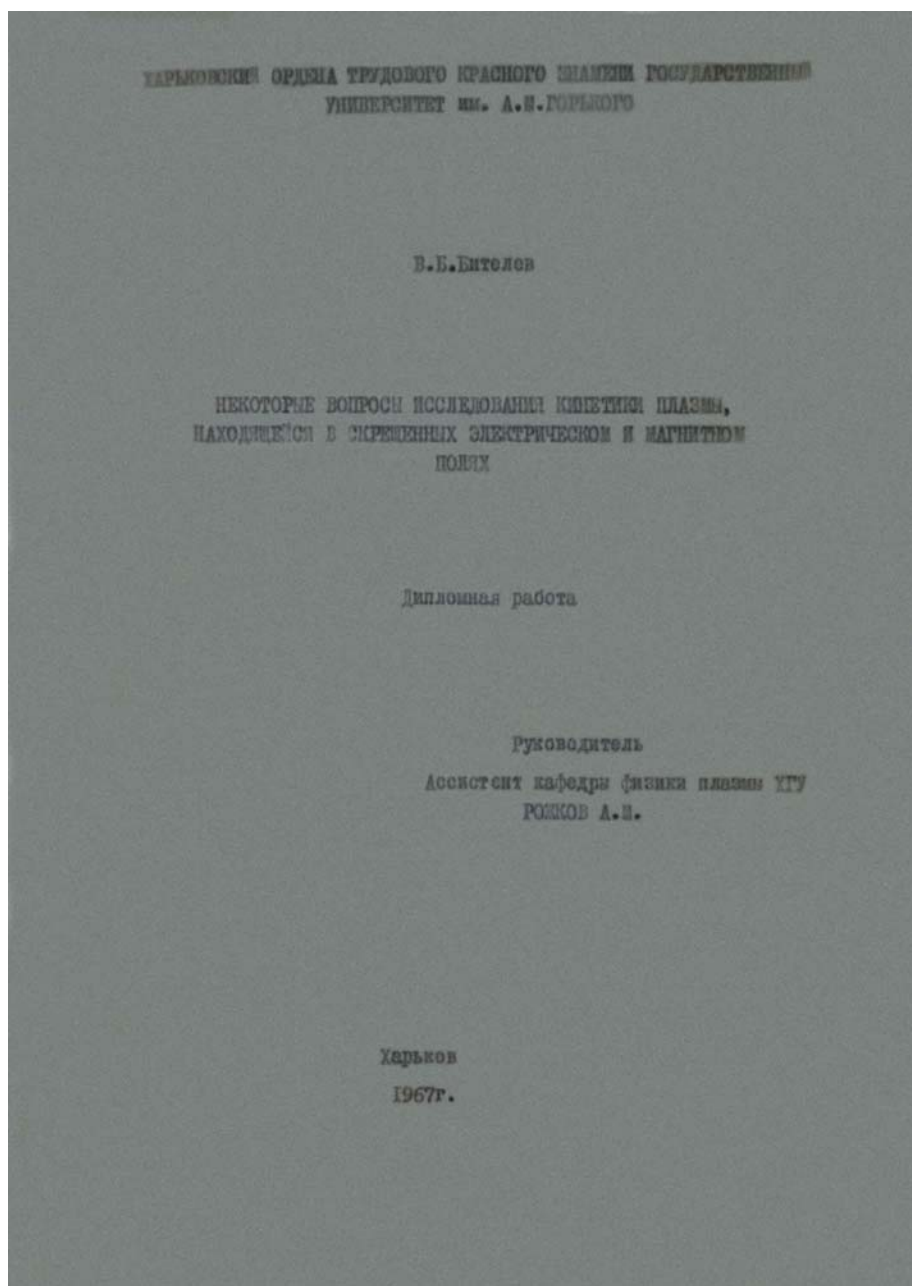
Редакция позволила себе вынести тему дипломной работы в название всего материала и составить авторский коллектив истинных исполнителей первой работы в области вращающейся плазмы в Харьковском университете, положившей начало развитию одного из продуктивнейших научно-прикладных направлений на физико-техническом факультете ХНУ им. В. Н. Каразина.

#### Из перечня научных и учебно-методических работ Фареника Владимира Ивановича

№ п/п	Название	Характер работы	Выходные данные	Соавторы
1	2	3	4	5
1.	Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме	печат.	«Письма в ЖЭТФ», 10, вып. 2, 71. 1969	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А. Власов В. В.
2.	Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме	печат.	Ротапринт ФТИ АН СССР, ХФТИ 69-35, Харьков, 1969	Рожков А. М. Степанов К. Н.
3.	Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях	печат.	УФЖ, 14, вып. 2, 1856, 1969	Власов В. В. Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
4.	Cyclotron resonance instability in rotating plasma	печат.	Plasma Physics, 12, 519, 1970	Rozkov A. M. Stepanov K. N. Suprunenko V. A. Vlasov V. V.
5.	Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях	печат.	Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза», вып. 1. из-во «Наукова думка», Киев, 1971	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.
6.	Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме	печат.	Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза» вып. 3, стр.193, из-во «Наукова думка», Киев, 1972	Рожков А. М. Степанов К. Н. Супруненко В. А.

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕТИКИ ПЛАЗМЫ,  
НАХОДЯЩЕЙСЯ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ**

**В. Б. Бителев, А. М. Рожков**



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в экспериментах, связанных с управляемым термоядерным синтезом, большое внимание уделяется изучению физики процессов в плазме, находящейся в комбинированных электрическом и магнитном полях.

В связи с этим особую актуальность приобретают эксперименты по изучению коллективных взаимодействий в ограниченной плазме.

Актуальность и научный интерес к исследованиям коллективных процессов продиктован следующим: во-первых, имеющиеся экспериментальные данные показывают, что ряд микронеустойчивостей, развивающихся в плазме, появляется в результате взаимодействия пучков заряженных частиц с плазмой. Поэтому дальнейшее изучение физики процессов, обуславливающих как появление таких неустойчивостей, так и их срыв, дают возможность дополнительного уточнения общей теории устойчивости ограниченной плазмы, находящейся в различных замкнутых электромагнитных ловушках.

Во-вторых, нелинейные взаимодействия в безстолкновительной плазме приводят к значительному увеличению энергии частиц плазмы. В связи с этим большой интерес представляет изучение физики таких взаимодействий с целью использования этого механизма для нагрева плазмы.

Изучение указанных явлений представляет значительный научный интерес в связи с разработкой новых методов высокочастотного нагрева и ускорения частиц.

Особый интерес представляет использование результатов исследования коллективных взаимодействий применительно к изучению физических процессов, протекающих в сверхвысокочастотных приборах со скрещенными  $E$  и  $H$  полями (в частности к исследованию магнетрона). Это важно с точки зрения теории СВЧ по следующим причинам. Первое, существующие в настоящее время одно- и двухпоточные теории магнетрона, в основу которых положены работы Лэнгмюра, Бриллюэна, Хелла, Гринберга, Харви и др., не дают строго ответа, почему в реальном магнетроне не выполняется условие Хелла, по которому выражение

$$1/2mr^2 + 1/2m(\Theta)^2 + e\varphi$$

равно нулю, при  $\varphi_0 = eB/8m \cdot r_0^2 (r_a/r_0 - r_0/r_a)$ , где  $r_a$  и  $r_0$  — радиусы анода и катода соответственно,  $\varphi$  — потенциал анода,  $B$  — напряженность магнитного поля.

Однако в экспериментах это не подтверждается, и работа Хартри показала, что ни скорость эмиссии, ни краевые эффекты, ни перенос магнитных силовых линий, ни пространственный заряд, ни эксцентриситет катода не могут служить причиной невыполнения условий Хелла. Отсюда становится понятным интерес к исследованию этого явления с точки зрения взаимодействия пучков в плазме. Второе, существующие теории дают расчет порога генерации колебаний магнетрона, который вообще не подтверждается экспериментально, и поэтому необходимо новое рассмотрение экспериментальных характеристик предгенерационного режима магнетрона с целью уточнения модели, принятой для теоретических расчетов.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Блок-схема установки, которая использовалась для проведения измерений, представлена на рис. 1. В камере 1 расположен гладкий цилиндрический анод 3 диаметром 45 мм и длиной 70 мм. На расстоянии 17 мм от анода установлен петлеобразный катод 2, представляющий собой вольфрамовую петлю

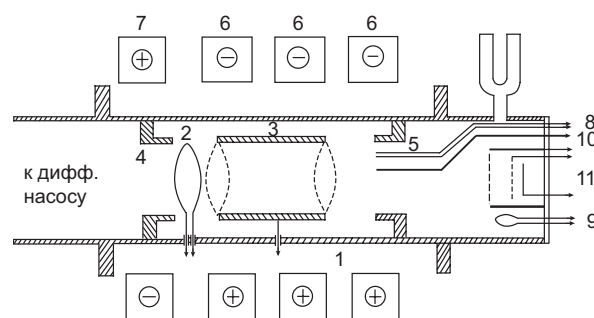


Рис. 1. Блок-схема установки:

1. камера,
2. катод,
3. диод,
- 4, 5 охранные кольца,
6. катушки основного магнитного поля,
7. катушка вспомогательного магнитного поля,
8. двойной зонд Лэнгмюра,
9. петлевой зонд,
10. штыревой зонд,
11. многосеточный зонд



26 мм. Охранные кольца в области катода — 4 и в области виртуального катода — 5 служат для создания лучшей однородности и симметрии электрического поля.

Магнитное поле в установке создавалось четырьмя катушками. Основное магнитное поле создавалось тремя катушками 6 с общим количеством витков — 5740. Ток в катушке вспомогательного поля протекает в направлении, противоположном току в основных катушках.

Подобное направление токов в катушках, а, следовательно, встречное направление магнитных полей, а так же соответственное расположение катушек магнитной системы, давало возможность расположить катод системы в плоскости, где магнитное поле равнялось нулю.

В эксперименте плазма создавалась следующим образом: электроны, ускоренные на промежутке анод-катод, из области, где  $H = H_{\text{мин}}$ , попадали в область нарастающего продольного магнитного поля. Здесь электрическое поле создает действующую на электрон силу, не зависящую от его скорости. Наоборот, магнитное поле создает силу, которая пропорциональна как скорости электрона, так и величине поля, искривляющего движение электрона. С помощью магнитного поля, достаточно большой напряженности, всегда можно отклонить траекторию электронов так, чтобы они не попали на анод. В этом случае электроны, вместо движения в направлении силовых линий электрического поля, движутся со скоростью в направлении, перпендикулярном, как электрическому, так и магнитному полям. Из-за наличия петлеобразного катода, вынесенного за пределы анода, движение электронов сопровождается их перемещением из области катода в область виртуального катода. Электроны при своем движении ионизируют молекулы остаточного газа. Облако пространственного заряда электронов, в принципе, представляют собой потенциальную яму для этих положительно заряженных частиц. И это облако можно использовать как ловушку для ионов с целью дальнейшего нагрева последних.

Соответственным подбором магнитных полей можно было изменять расположение плоскости, где магнитное поле равняется нулю, относительно катода. Этим достигались различные условия инжекции пучка электронов в продольное магнитное поле.

Для измерения излучения использовались петлевой — 9 и штыревой — 10 зонды. При исследовании формы, частоты и амплитуды колебаний вдоль продольной оси системы использовался подвижный штыревой зонд. При исследовании ухода электронов и их энергетических спектров использовался многосеточный зонд — 11. Измерение плотности велось двойным зондом 8. Сигналы с зондов подавались на осциллографы.

Система откачивалась диффузионным насосом до давления  $2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

### Измерение магнитного поля

Измерение продольного магнитного поля вдоль оси системы проводилось методом баллистического гальванометра отдельно для основных и вспомогательных полей. Соответствующее распределение продольного магнитного поля для основного поля представлено на рис. 2а, а для вспомогательного поля на рис. 2б. Эти распределения снимались при токе через катушки равным 1 амперу. По этим данным можно рассчитать конфигурацию магнитного поля для любых значений токов в катушках.

Одно из таких распределений суперпозиции полей, при токе 1 ампер, дано на рис. 3. Если рассматривать центральную часть системы, то имеется область, где магнитное поле равно нулю. В обе стороны от этой точки мы имеем случай нарастания магнитного поля (по направлению полей противоположное).

Таким образом, катод, расположенный в этой области, в зависимости от выбранной величины магнитных полей, может находиться в различных по величине и направлению магнитных полях. Этим самым достигаются различные условия инжекции электронного пучка.

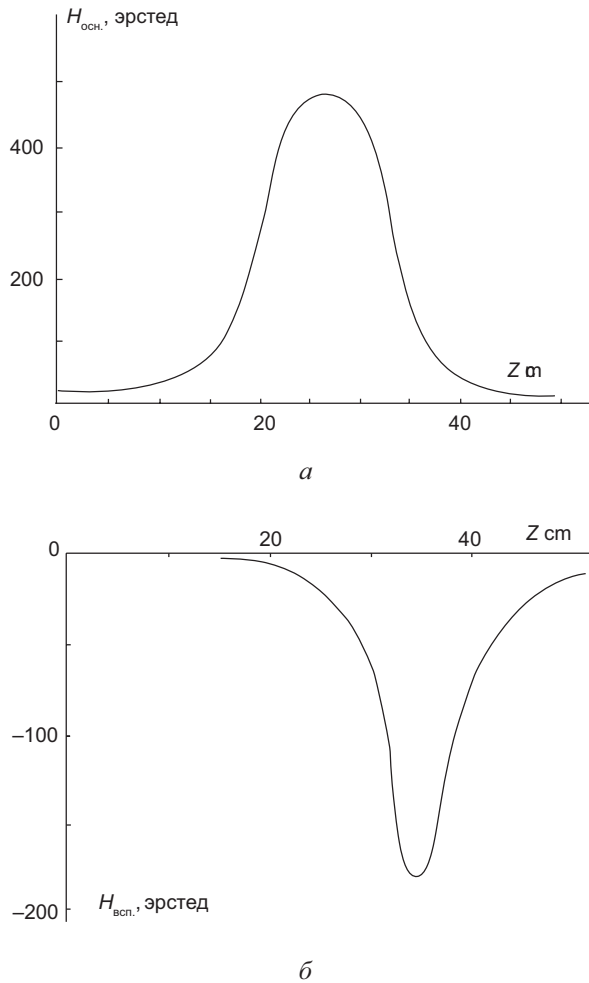


Рис. 2. а — распределение основного магнитного поля вдоль оси системы при токе  $J = 1$  А; б — распределение вспомогательного магнитного поля вдоль оси системы при токе  $J = 1$  А

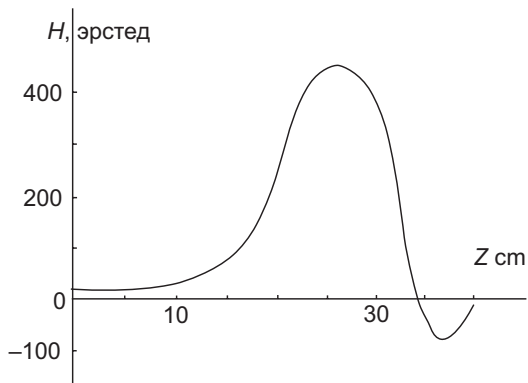


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль оси системы при токе  $J = 1$  А

Зависимость максимальных значений магнитного поля от тока даны на рис. 4а, а для основного поля на рис. 4б для вспомогательного.

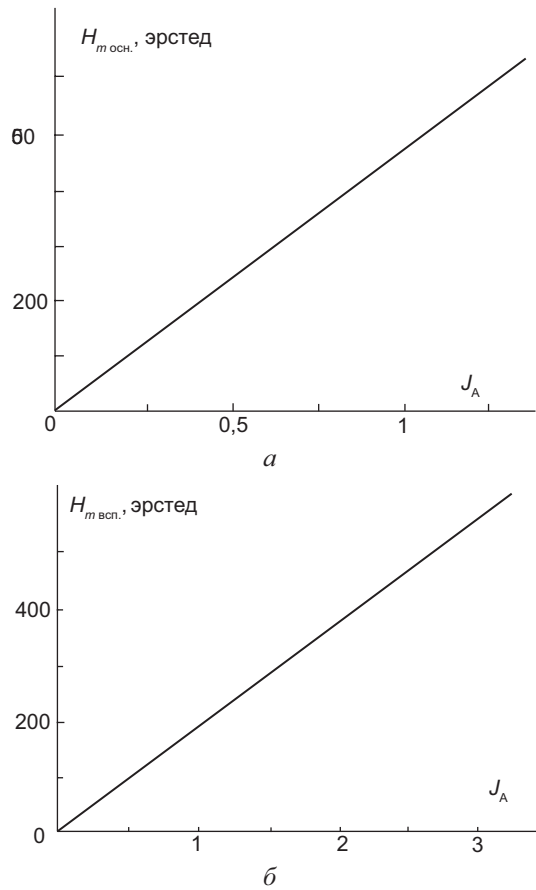


Рис. 4. График зависимости максимальной величины вспомогательного магнитного поля от тока в катушке

### Измерение плотности электронов и электронной температуры

Одной из важных характеристик плазмы является ее плотность. Для измерения плотности использовался метод двойного зонда Ленгмюра. Результаты обработки зондовых характеристик даны на рис. 5. Из полученных

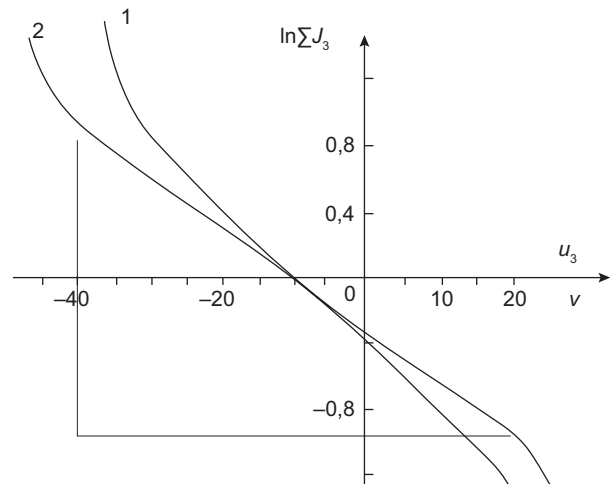


Рис. 5. Зондовые характеристики. Режимы:  
 1.  $U_A = 600$  В,  $H_{всп.} = 237$  эрстед,  $H_{осн.} = 195$  эрстед,  $N_e = 2,3 \cdot 10^9$  частиц/см<sup>3</sup>,  $T_e = 45$  eV;  
 2.  $U_A = 600$  В,  $H_{всп.} = 237$  эрстед,  $H_{осн.} = 219$  эрстед,  $N_e = 1,76 \cdot 10^9$  частиц/см<sup>3</sup>,  $T_e = 60$  eV

данных следует, что с изменением основного магнитного поля имеет место, как изменение электронной температуры, так и изменение плотности электронов. Так как эти два измерения проводились вблизи границы электронного облака в области виртуального катода, то можно видеть, что при возрастании магнитного поля происходит сжатие облака. Измерения показали, что температура электронов порядка нескольких десятков электрон-вольт, а плотность частиц порядка нескольких единиц, умноженных на  $10^9 \text{см}^{-3}$ . Эти измерения носят чисто оценочный характер, поскольку провести исследование распределения плотности внутри облака зондовым методом затруднительно, так как внесение зонда в облако приводит к искажениям в структуре его полей, что проявляется в виде изменения спектра генерируемых частот. Кроме того, в случае генерации, зонд начинает работать как штыревая антенна. Это делает зондовые измерения недостаточно точными.

### Исследование токовых характеристик

Особенностями систем со скрещенными  $E$  и  $H$  полями является то, что анодный ток при некотором фиксированном анодном

напряжении, с увеличением напряженности магнитного поля и достижением им некоторой величины  $H_{кр}$ , резко падает до некоторой минимальной величины. Это объясняется тем, что траектория пучка электронов, попавшего в скрещенные  $E$  и  $H$  поля, искривляется. При достаточно больших величинах  $H > H_{кр}$  происходит такое искривление траектории электронов, что последние не могут достигнуть анода и приходят во вращательное движение. В наших условиях в силу геометрии электрического поля, происходит, кроме закручивания еще и движение в продольном направлении. В результате этого электроны движутся по замкнутым траекториям, ионизируя молекулы остаточного газа.

Таким образом, режим, при котором анодный ток достигает минимального значения, является режимом, при котором происходит образование нескомпенсированной плазмы. Проверка кривых анодного тока позволяет найти те значения магнитного поля, при которых происходит процесс создания нескомпенсированной плазмы.

В нашей работе было рассмотрено сорок режимов. Результаты этих измерений представлены на рис. 6, 7. На всех графиках видно изменение величины анодного тока при

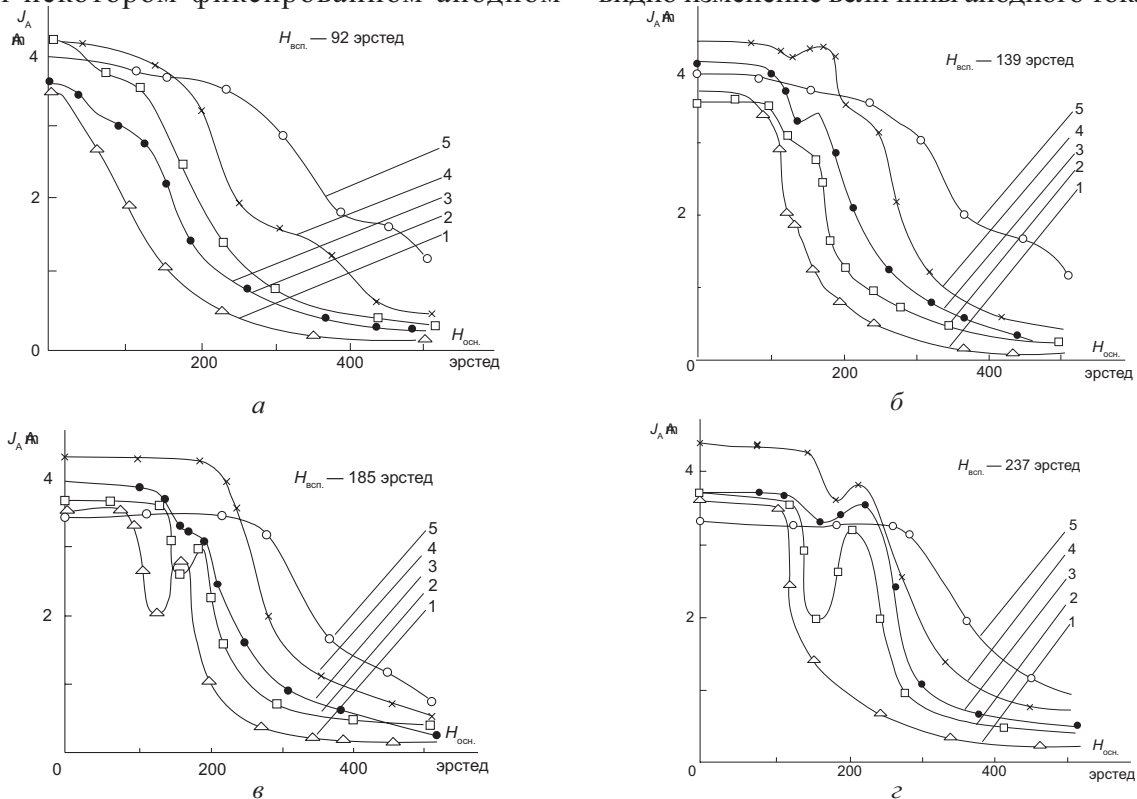


Рис. 6. Токовые характеристики. Режимы: 1.  $U_A = 300 \text{ V}$ ; 2.  $U_A = 400 \text{ V}$ ; 3.  $U_A = 500 \text{ V}$ ; 4.  $U_A = 600 \text{ V}$ ; 5.  $U_A = 800 \text{ V}$

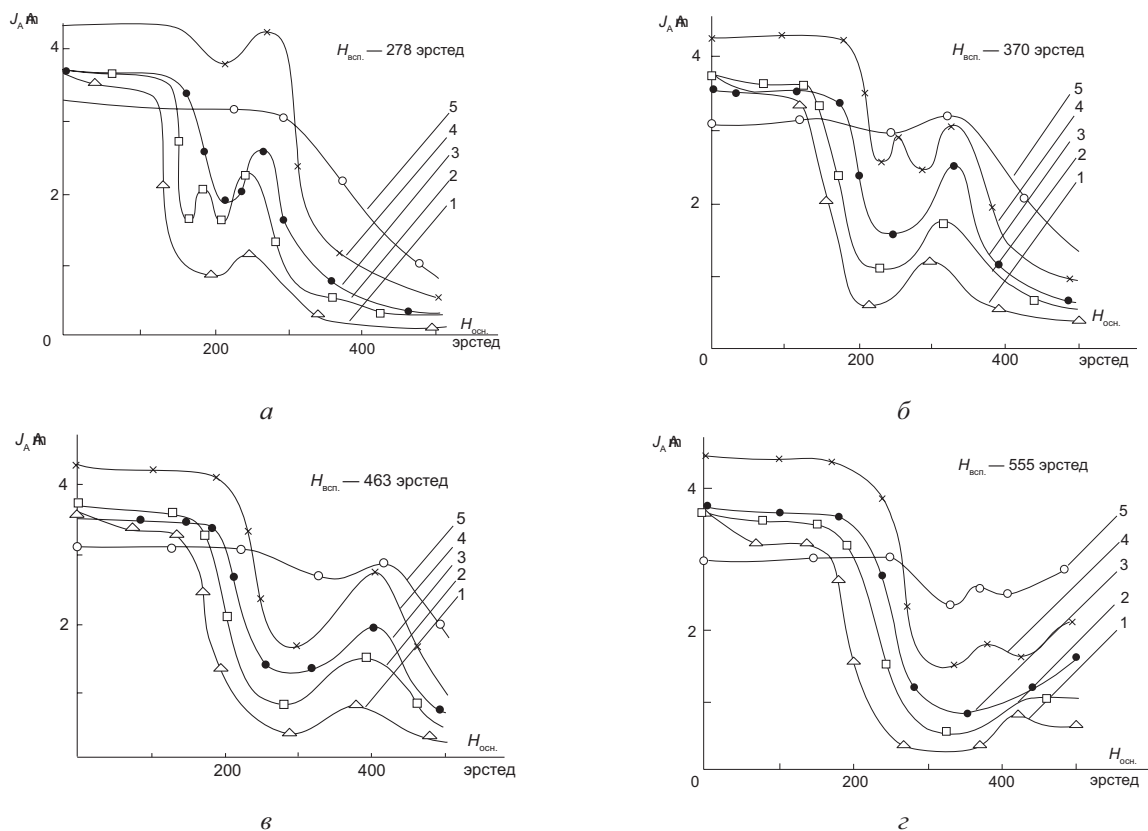


Рис. 7. Токовые характеристики. Режимы: 1.  $U_A = 300 \text{ V}$ ; 2.  $U_A = 400 \text{ V}$ ; 3.  $U_A = 500 \text{ V}$ ; 4.  $U_A = 600 \text{ V}$ ; 5.  $U_A = 800 \text{ V}$

достижении некоторой величины  $H_{\text{кр}}$ . Рассматривая кривые рис. 6, 7, можно отметить следующее: с ростом анодного напряжения, ток на анодах при  $H > H_{\text{кр}}$  возрастает (кривые 1, 2, 3, 4, 5 сняты при разных, возрастающих значениях анодного напряжения). Так же, если рассматривать режимы при различных  $H_{\text{всп}}$  (т. е. при различных условиях инжекции электронного пучка), можно отметить зависимость скорости спада анодного тока от  $H_{\text{всп}}$ .

Для ряда режимов, при подходе  $H$  к  $H_{\text{кр}}$ , на токовых характеристиках имеются особенности, природа которых пока что не выяснена.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Все эксперименты, проведенные на установке со скрещенными  $E$  и  $H$  полями, можно условно разделить на три основные части:

1. эксперименты по изучению устойчивости нескомпенсированного плазменного облака;

2. эксперименты по изучению условий нагрева ионов и электронов в электромагнитной ловушке;
3. эксперименты по исследованию высокочастотных спектров колебаний из облака нескомпенсированной плазмы и взаимодействия волн в плазме.

Ниже в такой же последовательности излагаются основные результаты этих экспериментов.

### Результаты экспериментов по изучению устойчивости нескомпенсированного плазменного облака

Устойчивость облака нескомпенсированной плазмы в устройствах со скрещенными  $E$  и  $H$  полями определяется, как правило отсутствием или наличием колебательных процессов. Эти процессы, как показали теоретические работы 4, 5, 6, вызываются автомодумящей плотности пучка заряженных частиц с последующим усилением колебаний в результате взаимодействия пучка с плазмой. В ряде экспериментальных работ 7, 8 было показано, что при прохождении



пучков заряженных частиц через плазму в ней развивается пучковая неустойчивость. Как правило, эта неустойчивость сопровождается высокочастотным излучением из плазмы. Идентифицируя начало колебаний в плазме с началом развития неустойчивости, можно, изучая высокочастотное излучение из плазмы, определять развитие неустойчивости или ее срыв. В этой связи мы проводили измерения интегральных спектров (без разделения частот) шумов из плазмы в зависимости от различных параметров электрического и магнитного поля, от различных условий инжекции электронного пучка в продольное магнитное поле. На рис. 8 представлены результаты этих измерений. Из них видно, что *а*) облако нескомпенсированной плазмы генерирует высокочастотные колебания практически во всем интервале значений магнитного поля; *б*) изменение положения плоскости Бриллюэна (т. е. изменение условий инжекции электронного пучка) приводит к значительным структурным перестройкам спектра высокочастотного излучения и к сдвигу начала генерации область больших магнитных полей.

В результате экспериментов было установлено, что с началом генерации облако нескомпенсированной плазмы начинает распадаться и в связи с этим изменяется анодный ток при постоянных значениях электрического и магнитного полей.

Это подтверждается осциллограммой на рис. 9. Здесь на верхнем луче сигнал от детектора излучения из плазмы, а на нижнем — колебания анодного тока. Из рис. 9 видно, что начало колебаний анодного тока

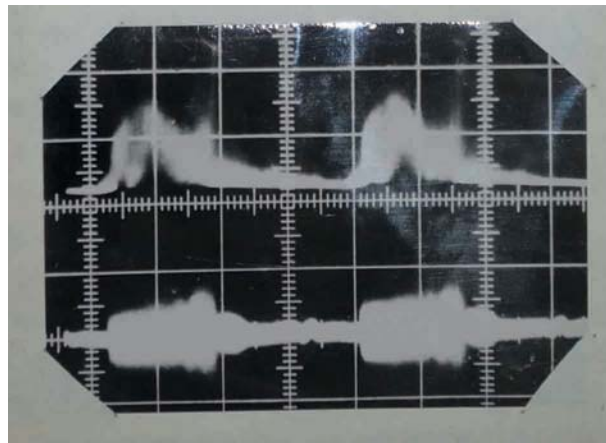


Рис. 9. Осциллограмма В4-излучения (верхний луч) и колебаний анодного тока (нижний луч)

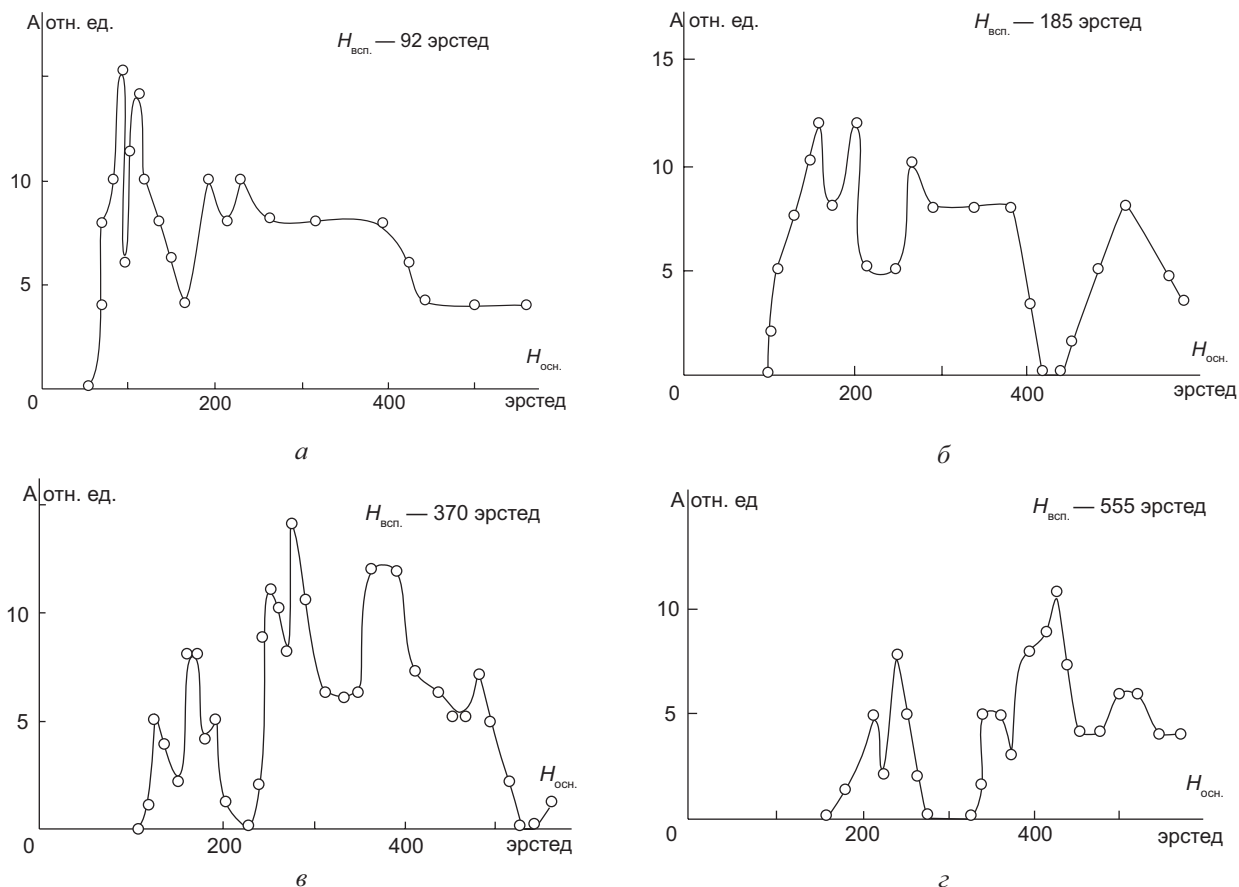


Рис. 8. Интегральные спектры излучения.  $U_A = 100$  В

и начало генерации из плазмы хорошо совпадают. Вероятно, в процессе генерации за счет нелинейных эффектов в плазме, некоторая часть электронов приобретает такую энергию, которая позволяет им уйти на анод при данном соответствии между электрическим и магнитным полями.

### Экспериментальные результаты по изучению условий нагрева электронов в электромагнитной ловушке

Как указывалось выше, облако пространственного заряда нескомпенсированной плазмы, в принципе, представляет собой ловушку для положительно заряженных частиц. В связи с этим, на ряду с экспериментами по устойчивости плазмы в такой ловушке, нами проводились эксперименты по изучению условий нагрева частиц в такой ловушке. В проведенных опытах было обнаружено, что

с началом генерации из плазмы вдоль магнитного поля наблюдался уход электронов в зависимости от величины магнитного поля при различных ускоряющих напряжениях см. рис. 10:

1. Кривые ухода электронов имеют пороговый резонансный характер;
2. С ростом ускоряющего напряжения количество электронов, уходящих вдоль магнитного поля, возрастает;
3. С изменением условий инжекции (т. е. с изменением положения плоскости Бриллюэна) начало ухода частиц перемещается в сторону больших значений магнитного поля;
4. Начало ухода электронов вдоль магнитного поля практически совпадает с началом генерации высокочастотных колебаний из плазмы.

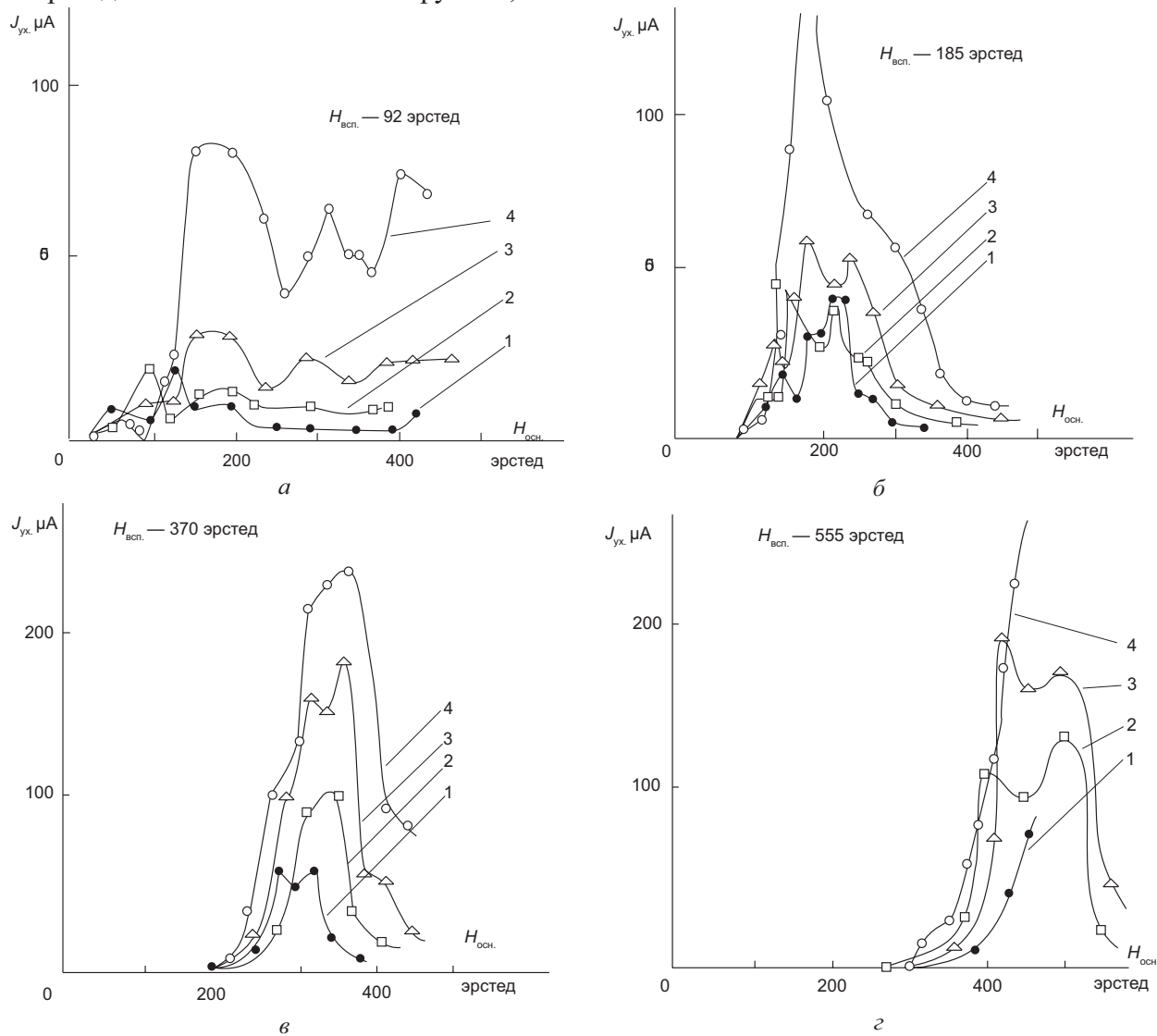


Рис. 10. Уход электронов вдоль магнитного поля. Режимы: 1.  $U_A = 300$  V; 2.  $U_A = 400$  V; 3.  $U_A = 500$  V; 4.  $U_A = 600$  V

Одновременно с уходом электронов на осциллограммах колебаний из плазмы наблюдались нелинейные искажения амплитуды. На рис.11 представлены типичные осциллограммы таких нелинейных искажений.

Можно предположить, что электроны, уходящие через торец системы, получают добавку энергии в результате взаимодействия с медленной продольной волной. Такой эффект, согласно работе 6, возможен при условии

$$V_e / V_\phi = \sqrt{eE\lambda / 2\pi V_\phi^2} \sim 1,$$

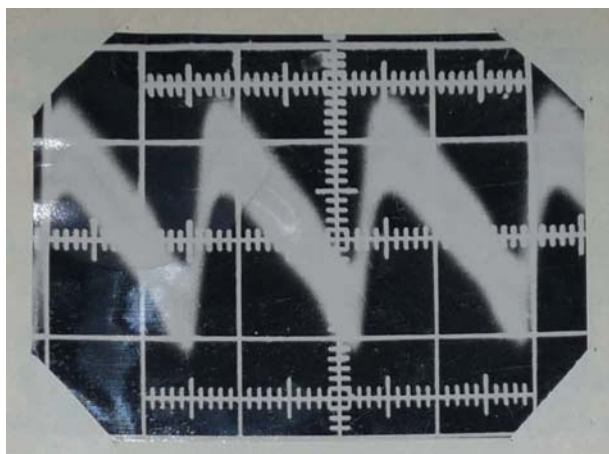
где  $V_e$  — скорость электрона,  $V_\phi$  — фазовая скорость волны,  $\lambda$  — длина волны,

$E$  — напряженность электрического поля волны в плазме.

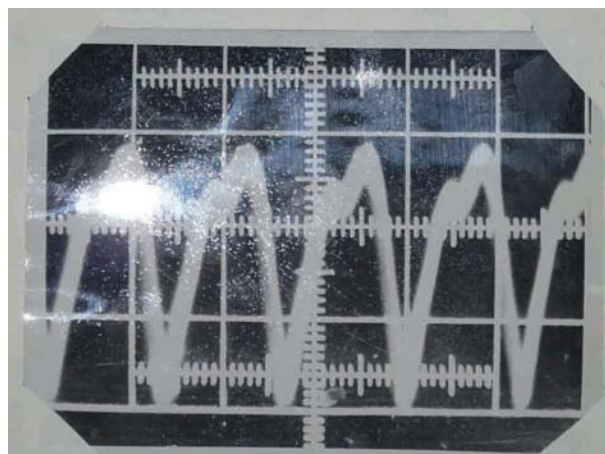
Исходя из этого, нами были измерены электрические спектры электронов, уходящих вдоль магнитного поля (рис. 12) и зависимость энергии этих электронов от ускоряющего напряжения (рис. 13).

Энергетический спектр электронов измерялся в области, где отсутствует тормозящий потенциал анода, т. е. измерялись электроны, энергия которых  $E_e > eU_A$ . На рис. 12 видно, что энергия уходящих электронов превышает величину  $eU_A$  на 50–100 электрон-вольт.

Зависимость энергии уходящих электронов от ускоряющего напряжения (рис. 13)

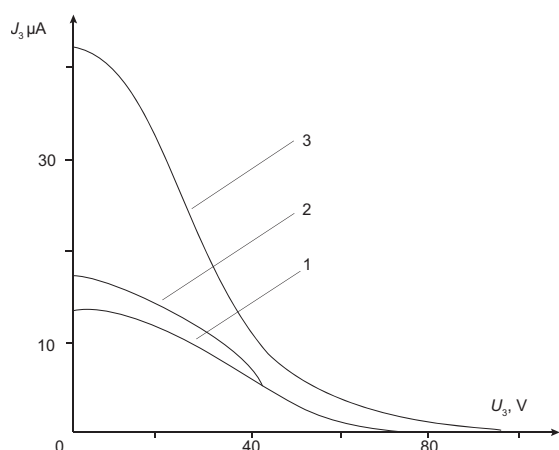


*a*

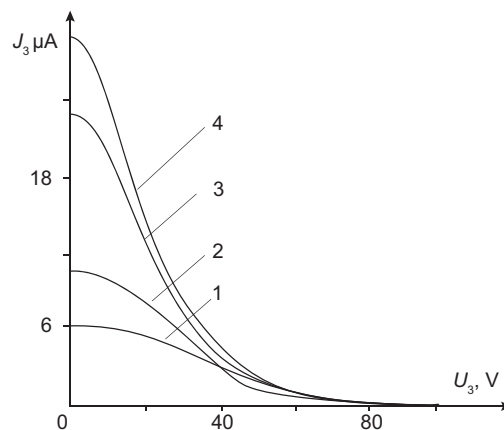


*б*

Рис. 11. Осциллограммы нелинейных эффектов. *a* — излучение соответствует рис. 10,  $H_{всп.} = 278$  эрстед, кривая 1; *б* — излучение соответствует рис. 10,  $H_{всп.} = 278$  эрстед, кривая 3



*a*



*б*

Рис. 12. Энергетический спектр электронов, уходящих вдоль магнитного поля. Режим: *a*. 1.  $U_A = 600$  V,  $H_{всп.} = 278$  эрстед,  $H_{осн.} = 192$  эрстед; 2.  $U_A = 600$  V,  $H_{всп.} = 278$  эрстед,  $H_{осн.} = 168$  эрстед; 3.  $U_A = 600$  V,  $H_{всп.} = 278$  эрстед,  $H_{осн.} = 109$  эрстед; *б*.  $U_A = 500$  V,  $H_{всп.} = 278$  эрстед. 1.  $H_{осн.} = 102$  эрстед, 2.  $H_{осн.} = 121$  эрстед, 3.  $H_{осн.} = 153$  эрстед, 4.  $H_{осн.} = 73$  эрстед

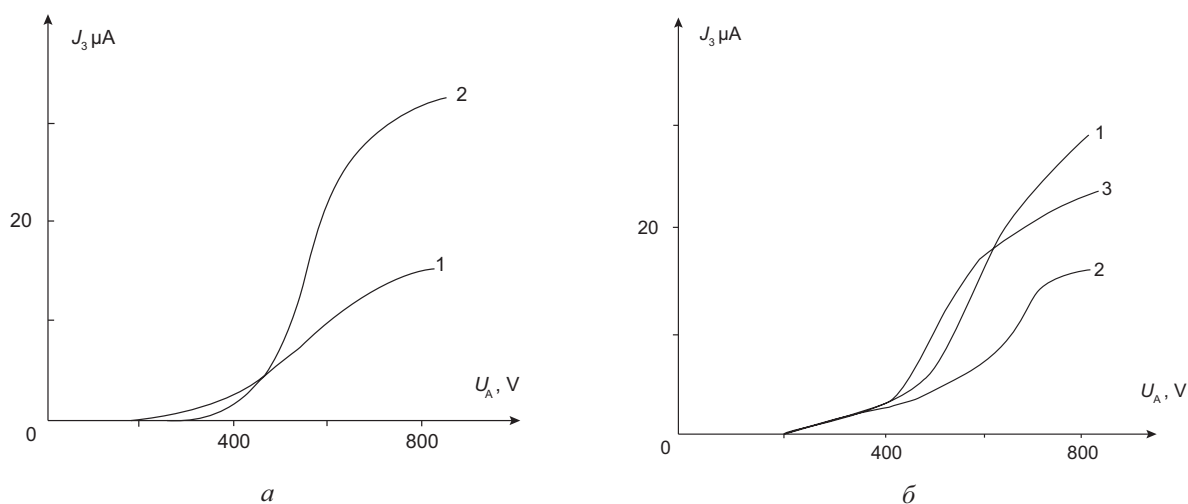


Рис. 13. Зависимость энергии ухода электронов от анодного напряжения. *а.* Режим:  $U_{\text{зонда}} = -20 \text{ В}$ ,  $H_{\text{всп.}} = 278$  эрстед. 1.  $H_{\text{осн.}} = 105$  эрстед, 2.  $H_{\text{осн.}} = 136$  эрстед. *б.* Режим:  $U_{\text{зонда}} = -30 \text{ В}$ ,  $H_{\text{всп.}} = 136$  эрстед. 1.  $H_{\text{осн.}} = 278$  эрстед, 2.  $H_{\text{осн.}} = 370$  эрстед, 3.  $H_{\text{всп.}} = 462$  эрстед

показывает, что наблюдается сильный рост энергии уходящих электронов от энергии первичного пучка.

**Результаты экспериментов по исследованию высокочастотных спектров колебаний из области нескомпенсированной плазмы и взаимодействию волн в плазме**

Как уже упоминалось выше, облако электронов начинает генерировать при слабых магнитных полях. Интегральные спектры изучения, приведенные выше, действительно показывают, что в очень широком диапазоне величин магнитного поля наблюдается генерация ряда гармоник от нескольких килогерц до десятков мегагерц. Измерение отдельных гармоник показало, что их частоты лежат в интервале 5–100 кГц по низким частотам и от 1–100 мГц по высоким.

При изучении интегральных спектров излучения, вдоль магнитного поля с помощью подвижной штыревой антенны, было установлено, что изучение носит локальный характер. Наибольшая интенсивность излучения наблюдалась в области, расположенной между анодом и виртуальным катодом. На рис. 14 представлены зависимости амплитуды излучения и распределение магнитного поля вдоль оси. Из рисунка так же видно, что максимальная амплитуда излучения наблюдается на частоте 60–70 кГц, далее следует спад амплитуды до некоторого

минимального значения с частотами порядка 7–10 кГц.

Для установления корреляции между зависимостью энергии электронов от ускоряющего напряжения и такой же зависимости амплитуды излучения, нами была измерена зависимость амплитуды излучения от ускоряющего напряжения. Эта зависимость представлена на рис. 15. Из хода кривой видно, что, начиная с некоторого ускоряющего напряжения, амплитуда излучения зависит от ускоряющего напряжения экспоненциально. Если сравнивать эту кривую с кривой 2 на рис. 13 то можно отметить, что зависимость энергии уходящих вдоль оси электронов практически растет экспоненциально с ростом  $U_A$ .

Некоторое ослабление роста энергии электронов с ростом ускоряющего напряжения можно объяснить влиянием ионного тока на результаты измерений, т. к. задерживающий потенциал для ионов в этом случае отсутствовал.

При изучении выделенных гармоник излучения из плазмы было установлено, что в исследованном диапазоне частот, последние линейно зависят от ускоряющего напряжения  $U_A$ . На рис. 16 показана зависимость частоты исследуемого сигнала из плазмы от величины ускоряющего напряжения.

В ряде экспериментов наблюдалось взаимодействие вводимой высокочастотной мощности с генерируемой из плазмы. Для этого от генератора вводилась калиброванная

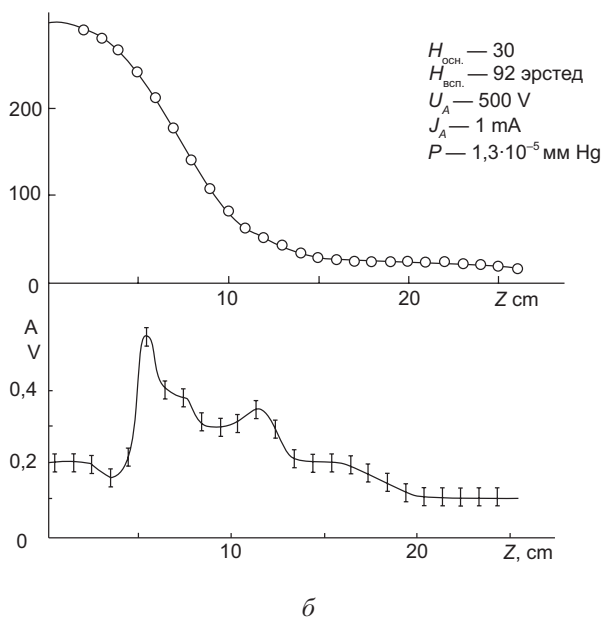
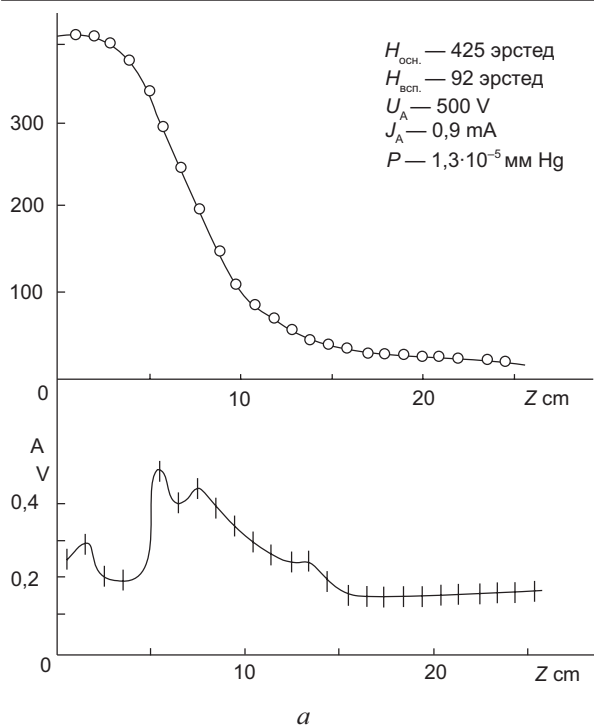


Рис. 14. Зависимость амплитуды излучения и магнитного поля от координаты

частота, сравнимая с частотой, генерируемой плазмой, а результирующее излучение осциллографировалось. На рис. 17 представлена типичная осциллограмма этого эффекта. На рисунках видно, что излучение на частоте 27 мГц промодулировано излучением частотой 1 мГц при рабочей частоте внешнего генератора 26 мГц.

Было так же отмечено, что с уменьшением амплитуды калиброванного сигнала глубина модуляции уменьшается и наоборот.

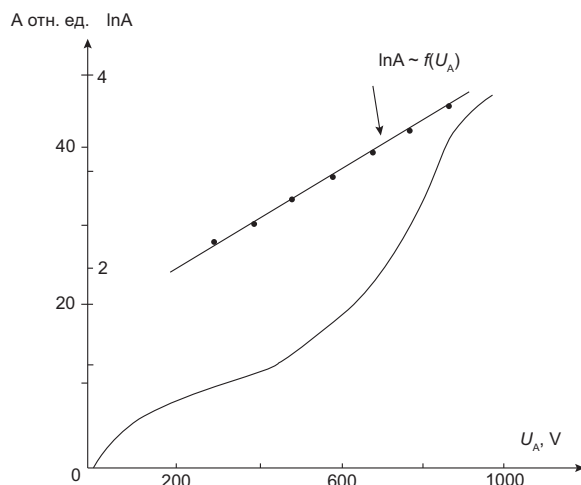


Рис. 15. Зависимость амплитуды излучения от анодного напряжения

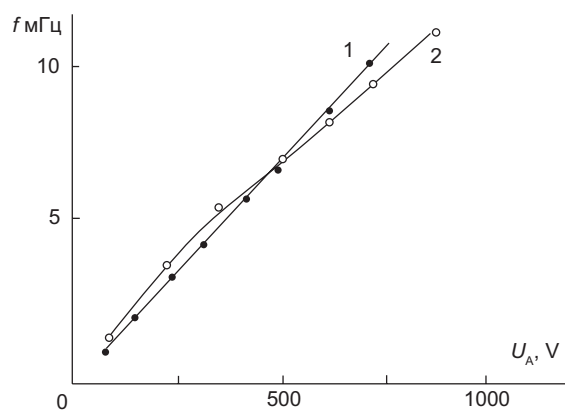


Рис. 16. Зависимость частоты излучения от анодного напряжения

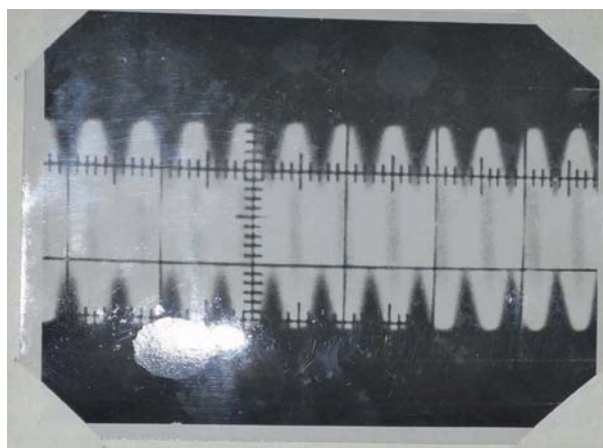


Рис. 17. Излучение на частоте 27 мГц промодулировано разностной частотой в 1 мГц при рабочей частоте внешнего генератора 26 мГц

### ВЫВОДЫ

Основные результаты проведенной работы можно вкратце сформулировать следующим образом.



1. При прохождении электронных пучков через нескомпенсированную плазму, находящуюся в скрещенных  $E$  и  $H$  полях, в плазме развиваются пучковые неустойчивости, приводящие к развалу облака нескомпенсированной плазмы.
2. Развал плазмы и появление неустойчивости сопровождается высокочастотным излучением в диапазонах частот от 5 до 100 кГц и от 1 до 100 мГц.
3. Появление генерации из облака сопровождается уходом электронов вдоль магнитного поля, а энергия последних на 50–100 электрон-вольт больше, чем энергия инжектированного в плазму пучка.
4. Было зарегистрировано взаимодействие внешних калибровочных сигналов с собственным излучением из плазмы.

В заключении выражаем благодарность за постоянный интерес к работе В. Т. Толоку и В. А. Супруненко.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Русанов В. Д. В Кн. «Современные методы исследования плазмы». Госатомиздат, 1962 г.
2. Brillouin L. // Phys Rev — 1944. — № 32. — 216 с.
3. Hull A. W. // Phys Rev — 1924. — № 23. — 112 с.
4. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. // ДАН. — 1949. — № 69. — 559 с.

5. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. // ЖЭТФ. — 1951. — № 21. — 1262 с.
6. Файнберг Я. Б. // Атомная энергия. — 1959. — № 6. — С. 431–447.
7. Федорченко В. Д., Муратов В. И. Руткевич Б. Н. // Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». — Вып. 3. — 44 с.
8. Супруненко В. А., Файнберг Я. Б., Толок В. Т. и др. // Сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». — Вып. 3. — 144 с.

#### REFERENCES

1. Rusanov V. D. V Kn. «Sovremennye metody issledovaniya plazmy». Gosatomizdat, 1962 g.
2. Brillouin L. // Phys Rev — 1944. — No. 32. — 216 p.
3. Hull A. W. // Phys Rev. — 1924. — No. 23. — 112 p.
4. Ahiezer A. I., Fajnberg Ya. B. // DAN. — 1949. — No. 69. — 559 p.
5. Ahiezer A. I., Fajnberg Ya. B. // ZhETF. — 1951. — No. 21. — 1262 p.
6. Fajnberg Ya. B. // Atomnaya energiya. — 1959. — No. 6. — P. 431–447.
7. Fedorchenko V. D., Muratov V. I. Rutke-vich B. N. // Sb. «Fizika plazmy i problemy upravlyаемого termoyadernogo sinteza». — Vyp. 3. — 44 p.
8. Suprunenko V. A., Fajnberg Ya. B., Tolok V. T. i dr. // Sb. «Fizika plazmy i problemy upravlyаемого termoyadernogo sinteza». — Vyp. 3. — 144 p.

#### Послесловие

В настоящей работе изучаются параметры плазмы, находящейся в скрещенном электрическом и магнитных полях. При этом создание магнитного поля предоставляет возможность обеспечивать минимальную величину его напряженности в области инжекции электронного пучка. Это позволяет расширить область параметров взаимодействия электронных пучков с плазмой. Комплекс результатов, полученных в настоящей работе с определенностью указывает на развитие пучково-плазменной неустойчивости, впервые описанной А. И. Ахиезером и Я. Б. Файнбергом.

Особое внимание в дипломной работе было уделено изучению характеристик магнетрона Габора. И, если «пучковая» научная тематика в такой постановке в дальнейшем группой А. М. Рожкова не была продолжена, экспериментальная техника для создания вращающейся плазмы оставила, без преувеличения, богатое наследие на многие годы. Использовались классические цилиндрические прямой и обращенный магнетроны, ячейка Пеннинга с длинным анодом, секционированным в различных вариантах, с дополнительным перемещаемым центральным электродом, разнообразные ионные источники и ускорители со скрещенными

полями, прочее. На этих устройствах, экспериментальных и технологических установках, оснащенных упомянутыми устройствами и их модификациями, в лаборатории А. М. Рожкова, в научных подразделениях его учеников и сподвижников выполнены десятки бюджетных и хозрасчетных работ, защищены около тридцати кандидатских, четыре докторских диссертации по тематике «плазма в комбинированных электрическом и магнитном полях», число публикаций около тысячи. Смотреть дополненную таблицу из статьи «**Rotating plasma**», Журнал физики и инженерии поверхности, 2016, том 1, № 1.

	Соискатель	Научный руководитель	Год защиты
1.	Рожков А. М.	Толок В. Т.	1970
2.	Фареник В. И.	Толок В. Т., Рожков А. М.	1974
3.	Власов В. В.	Степанов К. Н., Рожков А. М.	1976
4.	Пикуль М. И.	Достанко А. П.	1976
5.	Сосипатров М. В.	Рожков А. М.	1979
6.	Редванский В. М.	Рожков А. М.	1991
7.	Маслов А.	Рожков А. М.	1982
8.	Якимчук Ю.	Рожков А. М.	1981
9.	Бориско В. Н.	Лапшин В. И.	1989
10.	Битная И.	Лапшин В. И.	1993
11.	Лучанинов А. А.	Рожков А. М.	1986
12.	Петрушеня	Бориско В. Н.	2005
13.	Середа И. Н.	Бориско В. Н.	2006
14.	Юнаков Н. Н.	Фареник В. И.	1985
15.	Бизюков А. А.	Луценко Е. И.	1986
16.	Зыков А. В.	Фареник В. И.	1987
17.	Марущенко Н.	Фареник В. И.	1989
18.	Лисовский В. А.	Фареник В. И.	1993
19.	Дудин С. В.	Фареник В. И.	1995
20.	Ушаков А.	Фареник В. И.	1997
21.	Будянский А. М.	Фареник В. И.	1999
22.	Положий К. И.	Фареник В. И.	2001
23.	Яковин С. Д.	Фареник В. И.	2002
24.	Бизюков И. А.	Азаренков Н. А.	2007
25.	Кашаба А.	Бизюков А. А.	1999
26.	Харченко Н. Д.	Лисовский В. А.	2011
27.	Рафальский Д.	Дудин С. В.	2011
28.	Коваль В.	Лисовский В. А.	2015
<b>Доктора наук:</b> Рожков А. М. — 1984, Бизюков А. А. — 2002, Лисовский В. А. — 2008, Зыков А. В. — 2017			