

Б-955

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 10808

БЫСТРИЦКИЙ  
Виталий Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ  
В СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики при Томском политехническом институте (г. Томск).

Научные руководители: профессор доктор физико-математических наук А.Н. ДИДЕНКО,

старший научный сотрудник кандидат технических наук Ю.П. УСОВ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.П. САРАНЦЕВ,

доктор физико-математических наук В.И. КУРИЛКО.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Московский инженерно-физический институт, г. Москва.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 1977 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ 1977 г.  
в " \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного Ученого совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

М.Ф. ЛИХАЧЕВ.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Широкие возможности использования интенсивных пучков и ступков заряженных частиц в ядерной физике и смежных с ней областях, а также для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза определяют интерес исследователей к новым методам ускорения, одним из наиболее перспективных среди которых является метод коллективного ускорения в релятивистских электронных пучках (РЭП). Развитие этого направления связано с появлением в конце 60-х годов нового типа электронных ускорителей - прямого действия, работающих в наносекундном диапазоне на уровнях мощности до  $10^{13}$  Вт. Однако, несмотря на большой экспериментальный материал, накопленный по ускорению в РЭП, общая теория этого явления до сих пор отсутствует, а предложенные модели не охватывают всех аспектов наблюдаемых характеристик процесса. Правильное понимание механизмов коллективного ускорения ионов в РЭП чрезвычайно важно для построения общей теории взаимодействия РЭП с созданной им плазмой и активного управления процессом ускорения ионов с целью повышения его эффективности.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование коллективного ускорения ионов в РЭП в плане получения новых данных о характеристиках этого процесса и выяснения механизмов, принимающих в нем участие, проверки существующих модельных представлений и концепций, в частности - концепции предельного тока и глубокой потенциальной ямы, формирующейся в прианодной области дрейфа при инжекции РЭП с током, превышающим предельную величину для данной геометрии дрейфа.

Научная новизна. В основу диссертации положены работы /1-7/, выполненные автором в 1974-1976 годах. В них изложены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований коллективного ускорения ионов и связанных с ним процессов зарядовой нейтрализации и формирования потенциальной структуры дрейфующего РЭП, а также предложена новая модель ускорения ионов в РЭП в режиме низкого давления газа в дрейфовом пространстве. Подробно эти результаты приведены в разделе "Содержание работы".

Практическая ценность. I. Результаты проведенных исследований могут быть применены при разработке теории коллективного ускорения ионов в РЭП и устройств, использующих это явление. На основе схемы ускорителя ионов, предложенной в диссертации, в

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

НИИ ЯФ при ТПИ разрабатывается устройство для коллективного ускорения ионов на фронте РЭП в нейтральном газе.

2. Разработанные и примененные в рассматриваемой работе методики и регистрирующая аппаратура используются при экспериментальных исследованиях, проводимых с сильноточными пучками в НИИ ЯФ при ТПИ, г. Томск.

Апробация работ. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на Всесоюзной конференции по разработке и практическому применению электронных ускорителей в г. Томске в 1975 г., II Международном симпозиуме по коллективным методам ускорения в г. Дубне в 1976 г., УП Международном симпозиуме по электрическим разрядам и изоляции в вакууме в г. Новосибирске в 1976 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано семь статей в журналах "Письма в ЖТФ", "ПТЭ", трудах симпозиумов и конференции.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 108 страницах машинописного текста и иллюстрируется рисунками на 30 страницах. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 104 наименований.

Состояние вопроса и задачи исследования. Впервые коллективное ускорение ионных сгустков в диодах при формировании интенсивных электронных пучков было открыто и исследовано группой Плотто в 1960 г.<sup>/8/</sup>. Коллективное ускорение ионов в дрейфующих РЭП было обнаружено в 1968 г. группой Грейбилла<sup>/9/</sup> вслед за появлением наносекундных сильноточных ускорителей и сразу привлекло к себе внимание многих исследовательских коллективов. После первых экспериментальных работ важным этапом в изучении этого явления было создание теоретической модели ускорения ионов в РЭП Ростокером<sup>/10/</sup>. К настоящему времени в результате усилий исследовательских коллективов как в нашей стране, так и за рубежом накоплен большой экспериментальный материал и выдвинут ряд моделей коллективного ускорения ионов в РЭП<sup>/10-13/</sup>. Однако до сих пор общей теории этого явления не создано, а определенные аспекты его исследованы недостаточно (зависимость энергии ускоренных ионов от величины тока инжекции, влияние магнитного поля на ускорительные и зарядонейтрализационные процессы в РЭП, зависимость ускоряющих полей от фронтов напряжения и тока РЭП). В свете этого задачи исследования, поставленные в диссертации, разбиты на две группы. К первой относятся эксперименты по исследова-

нию зависимости ускорительных и зарядонейтрализационных процессов от различных параметров РЭП и внешних условий, а также по проверке предсказаний существующих модельных представлений (в частности - концепции предельного тока и глубокой потенциальной ямы на фронте РЭП<sup>/13/</sup>). Ко второй группе относятся численные исследования инжекции РЭП в эквипотенциальное пространство дрейфа различных геометрий, новая модель формирования глубокой потенциальной ямы на фронте РЭП и связанного с ней ускорения ионов в режиме низкого давления газа в дрейфовом пространстве, выдвинутая на основе совокупности полученных результатов. Более подробно эти вопросы изложены в разделе "Содержание работы".

К защите представляются следующие тезисы:

1. Условие  $I_{инж} \gg I_{пред}$  ( $I_{пред}$  - предельный ток<sup>/12/</sup>) является необходимым, но недостаточным для возникновения ускорительных процессов в РЭП.

2. Наложение продольного магнитного поля  $B \gg 400$  Гс на пространство дрейфа подавляет до уровня фона выход ионов, ускоренных в радиальном направлении в прианодной области дрейфа.

3. Наложение продольного магнитного поля  $B > B_{кр}$  ( $B_{кр}$  - критическое магнитное поле, обеспечивающее замагниченность электронного пучка) на пространство дрейфа замедляет протекание зарядонейтрализационных процессов в РЭП.

4. При наложении продольного магнитного поля  $B > B_{кр}$  на пространство дрейфа инжекция РЭП не сопровождается формированием в прианодной области глубокой потенциальной ямы ( $V_0 = (2+3) \cdot E_0/e$ ).

5. Электростатический механизм торможения головной части РЭП с конечными длительностями фронта напряжения и тока не достаточен для формирования глубокой потенциальной ямы при инжекции пучка в полость дрейфа.

6. Формирование глубокой ямы на фронте РЭП и ускорение в ней ионов до соответствующих энергий возможно за счет преобразования запасенной в прианодной области магнитной энергии РЭП в энергию электростатического поля при отражении от виртуального катода избыточной над предельным значением величины  $\Delta I$  тока инжекции.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диагностическая аппаратура для исследования временных и энергетических характеристик РЭП и ионных сгустков

Для исследования параметров РЭП и ускоренных ионных сгустков нами были разработаны и внедрены в эксперимент спектрометры, описанные в первой главе диссертации<sup>/1,2/</sup>. Основой спектрометров является стопа сигнальных металлических фольг расчетной толщины, разделенных экранирующими фольгами, ликвидирующими емкостную связь между ними, что существенно повышает точность измерения. Спектр РЭП восстанавливался стандартными методами регуляризации при решении системы алгебраических выражений типа

$$\Delta Q_i = \sum_k J(E_k) \bar{\varphi}_i(E_k),$$

где:  $(E_k)$  - искомый энергетический спектр,  $\Delta Q_i$  - заряд, поглощенный  $i$ -й фольгой спектрометра,  $\bar{\varphi}_i(E_k)$  - нормированная проинтегрированная по толщине фольги вероятность поглощения электрона с энергией  $E_k$  в  $i$ -й фольге. Точность восстановления спектров лежит в пределах 20%. Спектрометр многозарядных ионов позволял одновременно определять как среднее зарядовое состояние сгустка ионов (по величине пробега), так и среднюю (или максимальную) энергию ионов по времени пролета базы определенной длины. При этом ошибка в определении энергии составляет:

$$\delta E/E = (60 \delta t/L) \sqrt{2E/M_i},$$

где  $E$  - средняя кинетическая энергия ионов в МэВ,  $\delta t$  - ошибка в определении временного интервала при осциллографировании в нс,  $L$  - длина пролетной базы в см,  $M_i$  - масса иона в МэВ. К примеру, при работе на развертке осциллографа 6 ЛОР-2М 12 нс/см,  $\delta t = 2$  нс,  $L = 30$  см и  $E = 2$  МэВ  $\delta E/E = 20\%$ . Кроме характеристик описанных выше спектрометров, в 1-ой главе диссертации приводятся краткие характеристики ускорителей "Тонус" и "НСУ-600"<sup>/1,2,5/</sup> и генерируемых ими РЭП, конструкции и рабочие характеристики использованных в исследованиях дрейфовых делителей (для измерения провисания потенциала РЭП), нейтронно-активационных счетчиков (для измерения нейтронных потоков) и иного экспериментального оборудования.

Экспериментальные результаты исследования коллективного ускорения ионов в РЭП и их сравнение с модельными предсказаниями

Экспериментальные исследования процессов коллективного ускорения ионов в РЭП проводились в НИИ ЯФ при Томском политехническом институте на ускорителях "Тонус" и НСУ-600 с варьируемыми параметрами РЭП: для "Тонуса" -  $20 \text{ кА} \leq I_{\text{инжек}} < 60 \text{ кА}$ ,  $0,5 \text{ МВ} \leq V \leq 1,6 \text{ МВ}$ , для НСУ-600 -  $5 \text{ кА} \leq I_{\text{инжек}} \leq 15 \text{ кА}$ ,  $0,3 \text{ МВ} \leq V \leq 0,7 \text{ МВ}$ . Схема использованной экспериментальной установки представлена на рис. 1. Широкие диапазоны изменения параметров РЭП позволили выполнить следующие эксперименты:

1. Эксперименты с различными параметрами пространства дрейфа (род газа, его давление, геометрия пространства дрейфа) и постоянными параметрами РЭП.
2. Эксперименты с постоянными параметрами пространства дрейфа, но с переменными параметрами РЭП за счет варьирования анод-катодного зазора.

Основные результаты этих экспериментов сводятся к следующему:

а) в исследованиях, выполненных на "Тонусе", ускоренные ионы начинали регистрироваться при  $I_{\text{инжек}} \geq 1,3 \cdot I_{\text{пред}}$ , что находится в согласии с концепцией предельного тока<sup>/13/</sup> (см. рис. 2). Отсутствие наблюдаемых ускоренных ионов при  $I_{\text{инжек}} < 1,3 \cdot I_{\text{пред}}$ , очевидно, обусловлено конечным порогом регистрации систем детектирования;

б) в целом наблюдаемые характеристики ионных сгустков согласуются с электростатической природой механизма их ускорения<sup>/10/</sup> (независимость удельной средней энергии ионов от массы, ее примерное постоянство при низком давлении газа и неизменных параметрах РЭП, уменьшение эффективности ускорения ионов при уменьшении длины дрейфа до величины  $(2+3) R_{\text{тр}}$  и т.д.);

в) полученные результаты по ряду пунктов укладываются в модель<sup>/13/</sup> (режимы газовых давлений и области ускорения ионов, формы ионных сгустков и энергетический разброс, подавление ускорения ионов в аксиальном направлении магнитным полем  $B \geq 400$  Гс (рис. 3), примерное постоянство эквивалентного заряда в ионных сгустках независимо от рода газа и т.д.);

г) в то же время наши результаты в согласии с работой<sup>/14/</sup> указывают на существование прямой зависимости между отношением

$I_{инжек} / I_{пред}$  и отношением  $E$  и  $E_e$  для ускоренных ионов в режиме низкого давления (рис. 4). Это не согласуется с предсказаниями модели /13/, и для сохранения концепции формирования на фронте РЭП глубокой потенциальной ямы ( $V_{я} = (2+3) E_e/e$ ) необходимо введение механизма доускорения ионов /14/, либо в противном случае - нового представления о формировании потенциальной ямы с глубиной, зависящей от абсолютной величины превышения тока инжекции над предельным;

д) подавление выхода ионов, ускоренных в радиальном направлении при наложении магнитного поля  $B \geq 400$  Гс, также не согласуется с моделью /13/, в рамках которой наложение достаточно сильного магнитного поля должно приводить к увеличению выхода ионов, ускоренных в радиальном направлении;

е) отсутствие наблюдаемых ускоренных ионов при работе на ускорителе НСУ-600, несмотря на заведомое выполнение требования  $I_{инжек} > I_{пред}$  ( $I_{инжек} = 10$  кА,  $I_{пред} = 3$  кА) и выполненные условия  $\tau_{инп} \geq \tau_{ie} + L/\beta c$  /14/, где  $\tau_{инп}$  - длительность пучка,  $\tau_{ie}$  - время нейтрализации ямы вблизи анода (для  $P = 10^{-1}$  мм рт.ст.  $N_2$ ,  $\tau_{ie} = 10$  нс),  $L$  - длина дрейфа,  $\beta c$  - скорость фронта, указывает на недостаточность выполнения этих условий для возникновения ускорительных процессов в РЭП, а в рамках концепции глубокой потенциальной ямы - на ее отсутствие в этом случае, несмотря на выполнение указанных условий.

#### Магнитное поле и зарядонейтрализационные процессы в РЭП

Во второй главе описаны также эксперименты по исследованию зарядонейтрализационных процессов в РЭП, их результаты и анализ. Были выполнены измерения:

1. Скорости фронта РЭП в зависимости от давления и рода газа в трубе дрейфа при  $B = 0$ .

2. Скорости зарядонейтрализационных процессов в РЭП при наличии магнитного поля  $B > B_{крит}$  и без него. Для используемых параметров РЭП и пространства дрейфа  $B_{крит} \leq 2800$  Гс.

3. Эффективности прохождения РЭП в зависимости от давления и рода газа при наличии внешнего магнитного поля  $B \geq B_{крит}$ .

4. Временных и амплитудных характеристик провисания потенциала РЭП в различных участках трубы дрейфа.

Измерения проводились с помощью емкостных делителей, уста-

новленных в трубе дрейфа, цилиндра Фарадея и шунта обратного тока.

Внешнее импульсное магнитное поле создавалось соленоидом при разряде через него батареи конденсаторов с энергоемкостью 50 кДж.

Длительность импульса магнитного поля ( $T = 60$  мс) была достаточной для проникновения поля через стенки трубы дрейфа.

Основные результаты этих экспериментов сводятся к следующему:

1. При увеличении давления газа резкий скачок скорости фронта РЭП, ожидаемый согласно модели /13/, не наблюдается.

2. При наложении продольного магнитного поля  $B > B_{кр}$  в области давлений дрейфового газа, соответствующей режиму ускорения ионов, наблюдается замедление зарядонейтрализационных процессов.

3. При инжекции РЭП в вакуумную трубу дрейфа ( $P \leq 10^{-3}$  мм рт.ст) и наличии внешнего продольного магнитного поля  $B > B_{кр}$  в прианодной области глубокая потенциальная яма ( $V_{я} = (2+3) \cdot E_e/e$ ) не формируется.

Результаты проведенных измерений соответствуют картине образования вблизи анода виртуального катода с глубиной провисания  $V_{я} = (\gamma - 1) m c^2 / e$ , в то время как провисание потенциала на оси РЭП в середине трубы дрейфа в месте расположения делителя № 2 хорошо согласуются с величиной  $(\gamma - \gamma^{1/3}) m c^2 / e$ .

Как второй, так и третий пункт также не согласуются с представлениями модели /13/, в которой подавление ускорительных процессов внешним магнитным полем качественно объясняется возможным ускорением зарядонейтрализационных процессов в РЭП, а образование глубокой ямы - не связано с магнитным полем и зависит лишь от выполнения условий  $I_{инжек} \geq I_{пред}$ .

Таким образом, экспериментальные результаты, изложенные во второй главе диссертации, указывают на то, что формирование потенциальных ускоряющих ионы структур на фронте РЭП существенно зависит не только от выполнения требования  $I_{инжек} \geq I_{пред}$ , но и от таких характеристик, как наличие магнитного поля, длительность фронтов напряжения и тока РЭП, амплитудное значение тока инжекции и т.д.

## Электростатический механизм и формирование глубокой потенциальной ямы на фронте РЭП

В связи с изложенным выше нами были выполнены численные расчеты инжекции РЭП в полость дрейфа в квазистатическом приближении для выяснения роли электростатического механизма (положенно-го в основу моделей /10, 11, 12/) при формировании потенциальных структур на фронте РЭП. Описание этих расчетов, их результаты составляет содержание третьей главы диссертации.

Рассмотрены были три случая:

1. Инжекция РЭП в полупространство через разделяющую заземленную плоскость.

2. Инжекция РЭП в сферическую эквипотенциальную полость.

3. Инжекция РЭП в плоский эквипотенциальный диод.

Вычисления проводились для различных значений токов инжекции и длин фронтов напряжения и тока РЭП.

В расчетах использовался метод больших частиц /15/. Совместно численно интегрировались уравнения движения больших частиц и уравнения Пуассона для электрических полей с использованием т.н. схемы "перешагивания", в которой вычисления скорости и координаты частиц производились в моменты времени, сдвинутые относительно друг друга на  $0,5 \delta t$ , где  $\delta t$  - временной шаг интегрирования. В процессе отладки алгоритмов были исследованы различные способы коррекции с целью увеличения точности метода (уменьшение временного шага интегрирования, введение гауссова распределения больших частиц по энергии и т.д.). В целом, вышеперечисленные коррекции при достаточно малом шаге интегрирования ( $10^{-3}$  нс) слабо влияли на конечные результаты. Вычисления выполнялись в ЦОИЯИ (г. Дубна) и ВЦ Института оптики атмосферы СО АН СССР (г. Томск).

Основные результаты вычислений сводятся к следующему:

1. Численное исследование в квазистатическом приближении задачи инжекции РЭП в эквипотенциальное пространство дрейфа показало, что независимо от геометрии дрейфа при формировании потенциальной структуры инжектируемого РЭП существенную роль играет длительность фронта напряжения РЭП (преимущественную по сравнению с влиянием длительности фронта тока инжекции).

2. Формирование глубокой ямы  $V_a = (2+3) E_0/e$  наблюдается при нулевых или очень малых (по сравнению со временем прохождения РЭП характерных размеров полости) длительностях фронта напряже-

ния ( $\tau_n \ll L/v_c$ ), где  $L$  - характерные размеры полости,  $v_c$  - скорость РЭП). В противном случае глубокая яма не образуется (рис. 5).

3. Наличие фронта тока  $\tau_m$  конечной длительности не влияет на сам факт появления глубокой потенциальной ямы ( $V_a = (2+3) E_0/e$ ), а лишь затягивает момент ее появления, если за время, значительно меньшее, чем время перекрытия РЭП характерных размеров полости, инжектируемый ток успевает вырасти до величины  $I_{inj} \geq I_{пр}$ . В противном случае  $V_a < 2 E_0/e$  (рис. 6).

Полученные результаты указывают на неправомерность переноса картины формирования глубокой потенциальной ямы при нулевых длительностях фронтов напряжения /11/ на случай инжекции РЭП с конечной длительностью фронтов напряжения и тока, что положено в основу модели /13/. Таким образом, показано, что концепция глубокой потенциальной ямы, формирующей в прианодной области при инжекции РЭП с реальными длительностями фронтов тока и напряжения, может быть сохранена лишь при условии существования механизма иной, не электростатической природы, способного сформировать такую глубокую яму.

### Модель формирования глубокой ямы и коллективного ускорения ионов

В пятой главе изложен возможный механизм, обеспечивающий формирование глубокой ямы и соответствующие параметры процесса ускорения ионов, связанного с нею. Рассмотрен вопрос формирования виртуального катода в прианодной области. Показано, что в случае рассыпающегося пучка переменной геометрии ток инжекции может существенно превышать  $I_{пред}$ , определяемый выражением  $I_{пред} = mc^3 (\gamma^{2/3} - 1)^{3/2} / e (1 + 2L_n R_{tr}/r_n)$ , то есть, что формирование виртуального катода в этом случае наблюдается лишь при существенно больших значениях тока инжекции, чем  $I_{пред}$ .

Рассмотрена модель формирования глубокой потенциальной ямы, основанная на преобразовании магнитной энергии, накопленной в РЭП на участке катод - виртуальный катод, в энергию электростатического поля. Суть ее сводится к следующему. При инжекции РЭП в пространство дрейфа с ростом тока инжекции рассипание РЭП в прианодной области продолжается без формирования виртуального катода до достижения определенного значения  $\gamma_e \approx (2+3)/\gamma^2$ , соответствующего квазипостоянной геометрии РЭП. Необходимость достижения  $\gamma_e = (2+3)/\gamma^2$  для перехода к квазипостоянной гео-

метрии РЭП обусловлена конечной температурой РЭП (наличие поперечной энергии), что в случае  $f_e = I/\gamma^2$  приводит к бессиловому расширению РЭП за счет наличия радиальной компоненты скорости. При достижении  $f_e = (2+3)/\gamma^2$  рассеяние РЭП прекращается, происходит формирование виртуального катода и избыточная часть тока  $I = I_{инж}(t_1) - I_{пр}(t_1)$  отражается назад, к аноду. Уменьшение полного тока на участке катод - виртуальный катод (анод рассматривается достаточно прозрачным) на величину  $\Delta I$  приводит к генерации вихревой э.д.с., вызывающей ускорение инжектируемых электронов и углубление провисания потенциала на виртуальном катоде на величину  $\Delta V_a = (\Delta I/c)^2 (1 + 2 \ln R_{tr}/r_0)$ , где  $(1 + 2 \ln R_{tr}/r_0)$  - геометрический фактор. Ионы, находящиеся в этой области, могут быть ускорены до максимальной энергии  $E = (V_e + \Delta V_a) Z_i$ , а затем, после нейтрализации потенциальной ямы, они начинают движение вместе с фронтом РЭП. Глубина провисания потенциала на движущемся фронте соответствует виртуальному катоду  $V_a \sim (\gamma - 1) m c^2$ . Благодаря процессам предшествующей ионизации  $/II/$ , эта глубина уменьшается с течением времени.

Рассмотренный процесс отражения  $\Delta I$  является, как правило, однократным, и повторение формирования глубокой ямы в течение одного импульса может иметь место лишь при внезапном изменении геометрии РЭП. В рамках рассмотренной модели формирование глубокой ямы естественным образом связывается с необходимостью превышения  $I_{инж}(t_i)$  величины  $I_{пр}(t_i)$ , так как в противном случае не будет иметь места отражение  $\Delta I$  и формирование виртуального катода. В то же время в отличие от предсказания моделей  $/I3/$  это условие является необходимым, но не достаточным. Дополнительным условием достаточности образования глубокой ямы является выполнение требования

$$I_{инж}(t_i) \geq k I_{пред}(t_i),$$

где  $k$  - коэффициент больше единицы,  $t_i$  - момент, соответствующий формированию виртуального катода. В рамках рассматриваемой модели подавление ускорительных процессов магнитным полем обусловлено самим фактом отсутствия стадии глубокой потенциальной ямы, так как в этом случае формирование виртуального катода происходит сразу же при достижении током величины  $I_{пред}$  и, таким образом, на участке катод - виртуальный катод ток на протяжении всего импульса существенно не превышает  $I_{пред}$ . В модели

существует связь между параметрами пучка - длительностью РЭП, длительностью переднего фронта импульса напряжения и тока, а также параметрами пространства дрейфа - его геометрией, давлением и сортом заполняющего газа. При заданных параметрах РЭП легко определяются верхний и нижний пределы газового давления, при которых может происходить образование прианодной глубокой ямы. Нижний предел определяется таким давлением, при котором в течение всей длительности импульса РЭП степень пространственной нейтрализации не достигает величины  $(2+3)/\gamma^2$  и, таким образом, виртуальный катод не возникает, а соответственно отражения избыточного тока  $\Delta I$ , генерации вихревой ЭДС и образования глубокой ямы также не наблюдается. В этом случае глубина ямы на фронте РЭП при достаточно больших токах инжекции может достигать величины  $E_e/e$ . Верхний предел давления при заданных параметрах РЭП будет определяться невыполнением условия  $I_{инж}(t_i) \geq k I_{пред}(t_i)$ . В этом случае отражение избыточного тока  $\Delta I$  также не будет наблюдаться, либо оно будет несущественным. Подобная ситуация имеет место при работе с длинными фронтами РЭП и достаточно высоким давлением газа. Таким образом, рассматриваемый механизм эффективно "работает" в режиме низкого давления и перестает быть существенным в режиме высокого давления или "убегания", когда скорости нейтрализации опережают скорость нарастания тока. Характер ускоряющих ионы полей в модели - явно электростатический, несмотря на индукционную природу возникновения глубокой стационарной ямы. В связи с этим все экспериментально установленные закономерности ускорения ионов, согласующиеся в электростатической природой коллективного механизма ускорения, соответствуют и предложенной модели. Рассмотренная модель связывает максимальную глубину формируемой потенциальной ямы с величиной  $\Delta I$  - превышения тока инжекции над предельным к моменту достижения  $f_e = (2+3)/\gamma^2$ . В ее рамках возможно формирование ямы глубиной, превышающей  $(2+3) E_e/e$ , что согласуется с нашими данными и экспериментальными результатами  $/I4/$  и не нуждается в привлечении гипотезы захвата и доускорения на фронте РЭП ионов в тех режимах давления, где, по всей вероятности, это не должно наблюдаться.

Сравнение предсказаний модели с экспериментальными результатами лабораторий Аино Физикс, Физикс Интернейшенл (рис.7), ФИАН, Сандиа, ЭэР Форс, НИИ ЯФ (рис. 8) показывает хорошее согласие. Модель, как и эксперимент, указывает на отсутствие ускорения

тельных процессов при работе на НСУ-600 (рис. 8) (отсутствие избыточного тока  $\Delta I$ ) и наличие ионов с энергией, превышающей энергию РЭП в 5-7 раз в случае экспериментов группы ЭЭР Форс. В рамках модели с уменьшением энергии электронов РЭП  $\gamma$  - величина тока инжекции, при которой возможно коллективное ускорение ионов, смещается в область больших значений. Это обусловлено ростом величины  $(2+3)/\gamma^2$  и соответственно  $I_{пред}(\tau)$ .

Рассмотренный выше механизм формирования глубокой ямы может быть эффективно использован в предложенном нами устройстве, где генерируемый НСУ РЭП инжектируется в первую секцию, содержащую газ под высоким давлением, так что выполняется условие хорошей транспортировки, а радиус секции равен радиусу РЭП. Первая секция отделена от второй секции гораздо большего диаметра с низким давлением газа  $P_2 \ll P_1$  прозрачной для РЭП фольгой. Формирование виртуального катода в секции № 2 в этом случае приводит к отражению почти всего тока инжекции и соответствующей генерации  $E_{вихр}$  большой амплитуды, формирующей глубокую потенциальную яму за фольгой в секции № 2, в которой ионы могут быть ускорены до энергии, значительно превышающей энергию РЭП.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны, сконструированы и внедрены в эксперимент спектрометры для снятия энергетических и временных характеристик РЭП и ускоренных ионов /1,2/.

2. Выполнены экспериментальные исследования коллективного ускорения ионов в РЭП в зависимости от различных параметров РЭП и пространства дрейфа /3,4,7/. В целом полученные результаты согласуются с электростатической природой механизма ускорения ионов. В согласии с /14/ получена прямая зависимость между  $I_{инж}/I_{пред}$  и  $E/E_e$ , что находится в соответствии с картиной потенциальной ямы, глубина которой зависит от  $I_{инж} - I_{пред}$ .

3. В экспериментах, выполненных на НСУ-600, установлено, что условие  $I_{инж} > I_{пред}$  /13/ не является достаточным для возникновения коллективного ускорения ионов в РЭП.

4. Получены данные о том, что наложение магнитного поля  $B \geq 400$  Гс подавляет до уровня фона выход ионов, ускоренных в радиальном направлении.

4. В прямых измерениях получены новые экспериментальные данные об отсутствии стадии глубокой потенциальной ямы  $V_d \approx (2+3) E_e/e$

в прианодной области при наложении на пространство дрейфа аксиального магнитного поля  $B > B_{кр}$ . Наши данные согласуются с картиной формирования в этой области виртуального катода /5/.

5. Впервые выполнены прямые измерения скоростей протекания зарядонейтрализационных процессов в РЭП в условиях полной замагниченности РЭП /5/.

6. Получены новые результаты о замедлении зарядонейтрализационных процессов при наложении аксиального магнитного поля  $B > B_{кр}$ .

7. Выполнены численные исследования инжекции РЭП с конечной длительностью фронта напряжения в эквипотенциальную полость дрейфа /7/.

8. Получены новые данные о существовании зависимости глубины формируемой ямы от длительности фронтов напряжения и тока РЭП.

9. Впервые численными расчетами показано, что электростатический механизм недостаточен для формирования глубокой ямы  $V_d = (2+3) E_e/e$  при инжекции РЭП с фронтами тока и напряжения конечной длительности.

10. Предложена новая модель формирования потенциальной ямы в прианодной области и связанного с ней ускорения ионов, основанная на преобразовании запасенной магнитной энергии в электростатическую энергию потенциальной ямы при отражении избыточного тока от виртуального катода /7/.

11. Предложена схема ускорителя ионов, использующая ускорительный механизм, лежащий в основе выдвинутой модели.



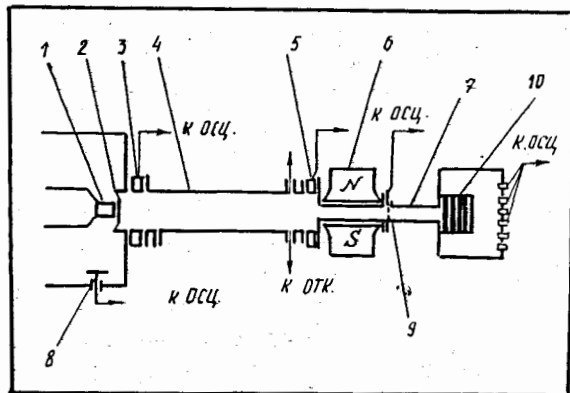


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ускорения ионов в РЭП: 1-катод ускорителя, 2-анод ускорителя, 3-шунт обратного тока пушки, 4-труба дрейфа, 5-шунт обратного тока трубы дрейфа, 6-очищающий магнит, 7-пролетная база, 8-делитель напряжения пушки, 10-ионный спектрометр.

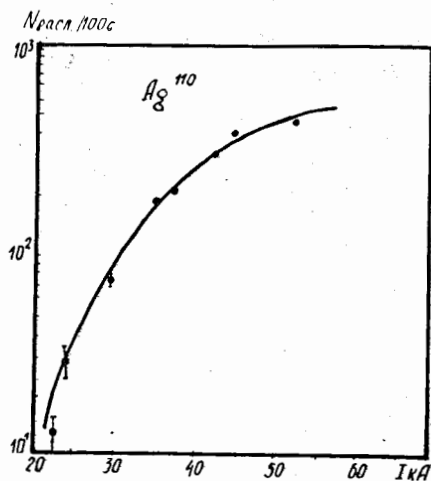


Рис. 2. Зависимость выхода  $^{110}\text{Ag}$  от тока инжекции РЭП. Газ - He,  $P = 3 \cdot 10^{-1}$  мм рт.ст.,  $L = 60$  см,  $D = 90$  мм. Ускоренные ионы регистрируются по нейтронному выходу из реакции  $\text{Be}^9 + \text{He}^4 = \text{B} + \text{C}^{12}$ .

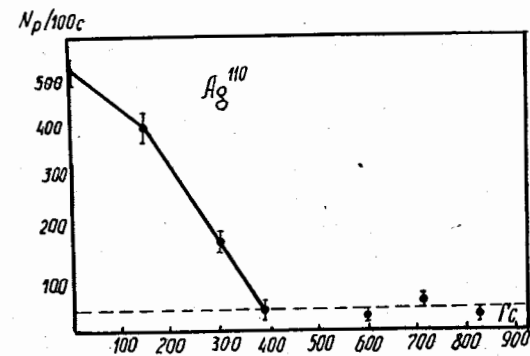


Рис. 3. Зависимость выхода  $^{110}\text{Ag}$  от величины продольного магнитного поля в реакциях:  $\text{Be}^9 + \text{He}^4 \rightarrow \text{n} + \text{C}^{12}$ ,  $^{109}\text{Ag} + \text{n} \rightarrow ^{110}\text{Ag}$ ,  $P = 3 \cdot 10^{-1}$  мм рт.ст. He,  $D = 90$  мм,  $L = 60$  см,  $I_0 = 40$  кА,  $V_c = 1$  МэВ.

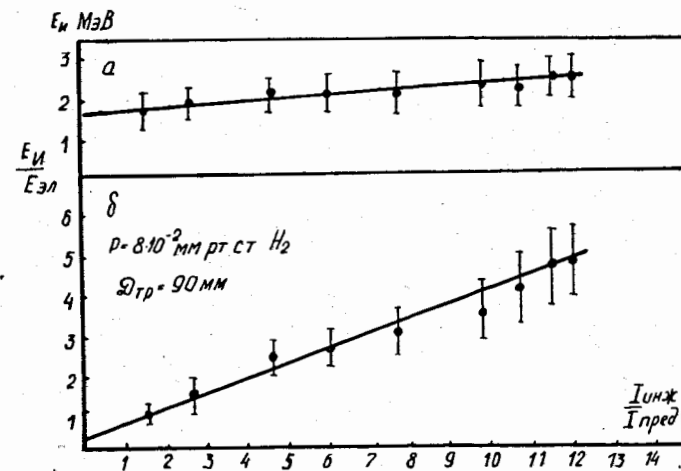


Рис. 4. а - зависимость энергии ионов водорода от отношения  $I_{\text{инж}}/I_{\text{пред}}$ ; б - зависимость  $E_H/E_{\text{эл}}$  от отношения  $I_{\text{инж}}/I_{\text{пред}}$ . Газ -  $\text{H}_2$ ,  $P = 8 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст.,  $D = 90$  мм,  $L = 30$  см.

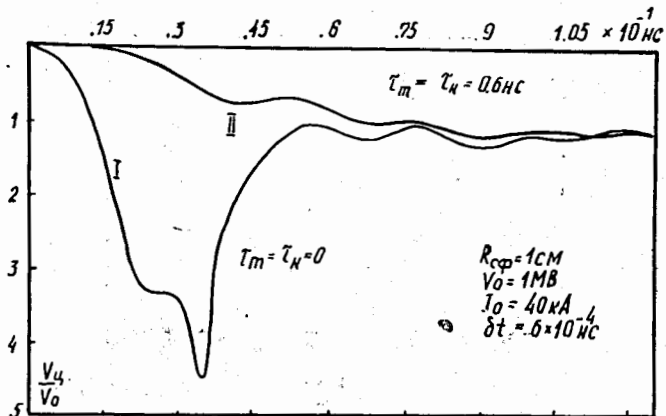


Рис. 5. Зависимость потенциала в центре сферы от времени при инъекции РЭП с различными параметрами.

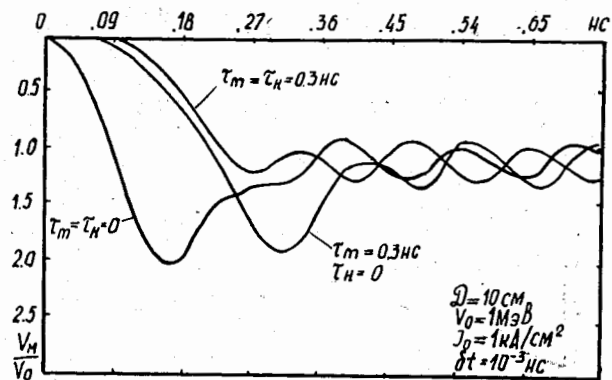


Рис. 6. Зависимость  $V_{\max}$  от времени при инъекции РЭП с различными параметрами в эквипотенциальный диод.

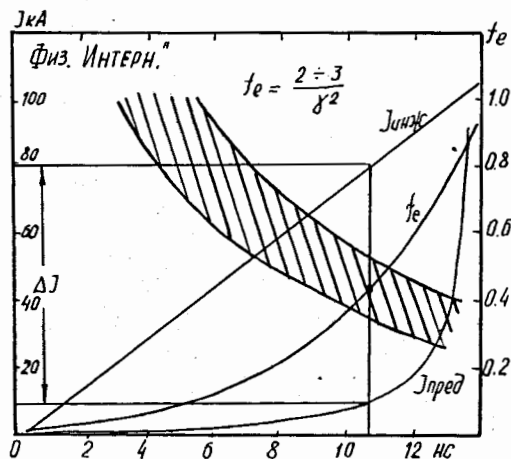


Рис. 7. Графическое определение  $\Delta I$  для РЭП с параметрами:  $V_0 = 1$  МВ;  $I = 115$  кА,  $\tau_n = \tau_m = 15$  нс; газ -  $H_2$ ,  $P = 10^{-1}$  мм рт.ст.  $I + 2 \ln R_t/r_n = 1,8$ .

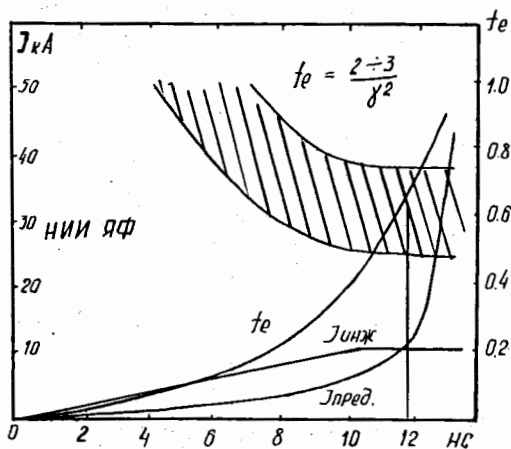


Рис. 8. Графическое определение  $\Delta I$  для РЭП с параметрами:  $V_0 = 0,5$  МВ,  $I = 10$  кА,  $\tau_n = \tau_m = 10$  нс; газ  $H_2$ ,  $P = 10^{-1}$  мм рт.ст.,  $I + 2 \ln R_t/r_n = 2,08$ .

## Л И Т Е Р А Т У Р А

Работы, положенные в основу диссертации

1. Быстрицкий В.М., Стерлигов А.Г., Усов Ю.П., ПТЭ, 1976, № 3, стр. 42-43.
2. Быстрицкий В.М., Усов Ю.П., Щустова В.Н., "Письма в ЖТФ", т. I, в. 7, 1975, стр. 338-441.
3. Быстрицкий В.М., Ремнев Г.Е., Стерлигов А.Г., Усов Ю.П., Щустова В.Н., Материалы Всесоюзной конференции по разработке и практическому применению электронных ускорителей, Томск, изд. ТГУ, 1975, стр. 175.
4. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И., Стерлигов А.Г., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П., "Письма в ЖТФ", 1976, т. 2, стр. 80-84.
5. Быстрицкий В.М., Донсков В.И., Подкатов В.И., Усов Ю.П., "Письма в ЖТФ", 1976, т. 2, в. 21, стр. 991-995.
6. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Усов Ю.П., Щустова В.Н., Труды VII Международного симпозиума по электрическим разрядам в вакууме, Новосибирск, 1976, стр. 362-365.
7. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И., Усов Ю.П., Щустова В.Н., Программа II Симпозиума по коллективным методам ускорения, Дубна, 1976, стр. II.

### Цитированные работы

8. Плютто А.А., ЖЭТФ, 1960, т.39, стр. 1589-1591.
9. Graybill S., Uglum L., Rizzo L., Mc Neil W., Ameg G., Childers K., Nablo S., Report ASA, 1968, 2315.
10. Rostoker N., Bull. Amer. Phys., 1969, n.14, p. 1047, 1049.
11. Poukey I.W., Rostoker N., Plasma Phys., 1971, 13, n.10, p.897-903.
12. Росинский С.Е., Рухадзе А.А., Рухлин В.Р., "Письма в ЖЭТФ", т.14, 1971, стр. 53-57.
13. Olson C.L., Phys. of Fluids, 1975, n.18, p. 585-606.
14. Miller R.B., Straw D.C., Proc. of Intern. Conf. on Elect. and Ion Beam Research and Tech., Albuquerque, 1976, v2, p.368-375.
15. Захаров А.В., Самарский А.А., Свешников А.Т., Сб. "Вычисл. методы в программировании", изд. МГУ, 1971, т. XVI.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июля 1977 года.