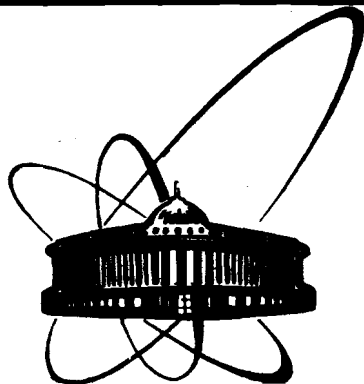


89-613



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 877

P9-89-613

**О.В.Архипов, Л.В.Бобылева, В.И.Казача,
Г.И.Коннов, А.К.Красных, И.В.Кузнецов,
А.Ю.Никитский, Э.А.Перельштейн, А.И.Сидоров**

**ФОРМИРОВАНИЕ И УСКОРЕНИЕ
СИЛЬНОТОЧНОГО ТРУБЧАТОГО
ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ
В МОДИФИЦИРОВАННОЙ СЕКЦИИ ЛИУ**

1989

Настоящая работа посвящена вопросам создания линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/ для проведения экспериментов по генерации мощного СВЧ-излучения. В 1985 году в ОИЯИ на базе одной секции ЛИУ-3000 реализован релятивистский диод и получено СВЧ-излучение в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн ^{/1/}. Напряжение на секции составляло ~500 кВ. С целью увеличения энергии электронов на основе систем ЛИУ ЛУЭК-20 ^{/2/} был создан ускоритель трубчатого пучка электронов ^{/3/} с напряжением ~800 кВ на секцию и током 500 А. Ниже изложены результаты, полученные при дальнейшем совершенствовании систем ЛУЭК-20 с целью увеличения суммарного напряжения на одной секции в режиме ускорения пучка до величины ~1,8 МВ и мощности в пучке до величины ~2 ГВт.

1. СХЕМА УСТАНОВКИ

Структурная схема установки приведена на рис.1. Модулятор ^{/2/} запитывает одну секцию ^{/1/} длиной 180 см, состоящую из 18 индукторов, в каждом из которых находится по два пермал-

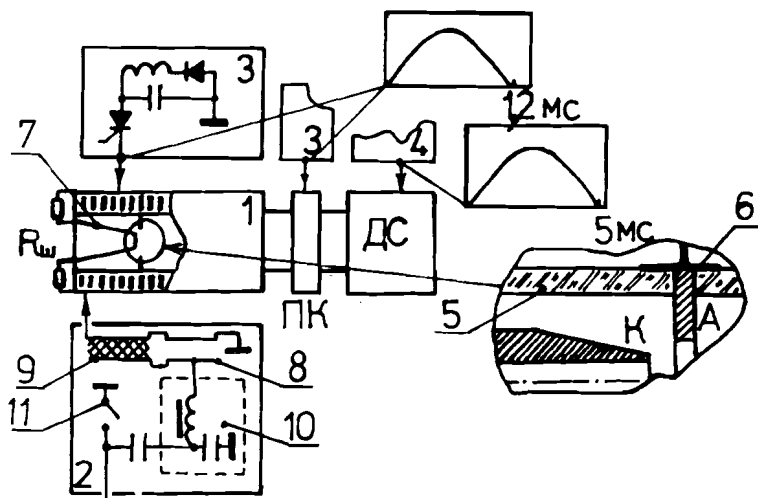


Рис.1. Схема установки.

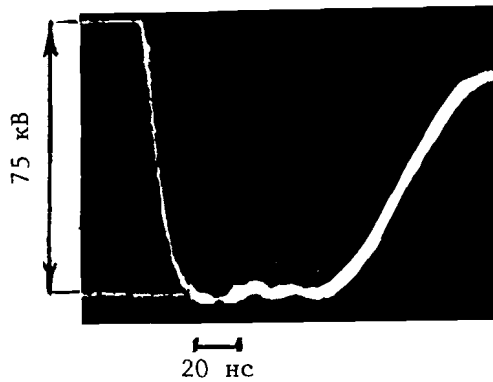


Рис.2. Импульс напряжения на эквивалентной нагрузке модулятора.

лоевых сердечника размером $460 \times 230 \times 25$ мм³. Система формирования ведущего магнитного поля B_z /3/, в основном, соответствует магнитной системе ЛИУ ЛУЭК-20^{1/2} и отличается только тем, что коли-

чество ячеек питания на одну секцию увеличено в два раза, а каждая ячейка запитывает последовательно соединенные катушки только одного индуктора. Это в $\sim \sqrt{2}$ раз увеличивает амплитуду B_z при том же зарядном напряжении /длительность полупериода тока $\sim 1,2$ мс/. В конце секции размещается переходная камера /ПК/, которая обеспечивает единый фокусирующий канал по тракту и вакуумную откачку. На выходе ускорителя установлен дополнительный соленоид /ДС/, в котором могут размещаться элементы диагностики или различные электродинамические структуры /ЭДС/ для экспериментов по релятивистской СВЧ-электронике. Длина области однородного магнитного поля в ДС ~ 600 мм. Источник импульсного питания /4/ катушек в ДС сконструирован так, что позволяет получать $B_z \approx 1,5$ Тл при длительности полупериода тока в катушках ~ 5 мс.

Общая схема модулятора осталась такой же, как описанная в работе /2/. Модулятор содержит формирующую линию /ФЛ/ с линейными /8/ и нелинейными /9/ отрезками, три магнитных звена сжатия мощности /10/ и коммутатор /11/ - тиратрон ТГИ1-2500/50. Максимальная мощность модулятора при работе на эквивалентную нагрузку была увеличена с 5 до 7,5 ГВт. На рис.2 приведен импульс напряжения на эквивалентной нагрузке / $R_z = 4,5$ Ом/ одного из шести параллельно работающих оконечных каскадов модулятора.

Для согласования модулятора с ускоряющей секцией по мощности были разработаны специальные неод-

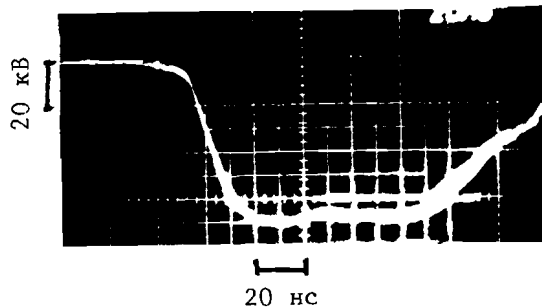


Рис.3. Импульс напряжения на выходе согласующих устройств.

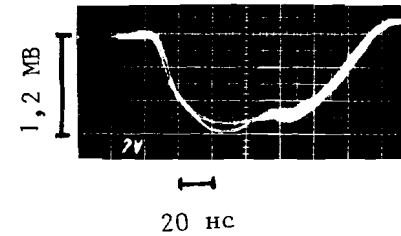


Рис.4. Изменение импульса напряжения на индукторах при включении $B_z = 0,7$ Тл.

нородные полосковые линии. На рис.3 показан импульс напряжения на выходе пакета неоднородных линий, нагруженных на эквивалентную нагрузку R_z .

Для уменьшения влияния B_z на амплитуду ускоряющего напряжения U_{Σ} , достигавшего $\sim 30\%$, в индукторы секции было встроено 36 экранов - медных дисков толщиной 2 мм с внутренним диаметром 230 мм и внешним - 450 мм. Экраны располагались с одной стороны от каждого сердечника, вплотную к нему. С увеличением амплитуды магнитного поля до 0,2 Тл величина U_{Σ} уменьшается на $\sim 8\%$ и при дальнейшем увеличении B_z практически уже не меняется. На рис.4 показаны наложенные друг на друга осциллограммы суммарного напряжения на 24 сердечниках и режиме холостого хода /без пучка/ с включенным / $B_z = 1$ Тл/ и выключенным магнитным полем. Амплитуда B_z из-за влияния встроенных экранов уменьшилась на $\sim 15\%$. Таким образом, с учетом изменения схемы системы формирования магнитного поля позволяет создавать в апертуре $\Phi 170$ мм поле с индукцией B_z до 1,5 Тл практически без ухудшения параметров индукционной системы. Эксперименты с трубчатым пучком проводились в режиме с $B_z = 0,7 \div 1$ Тл.

2. НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ

Применительно к сердечникам ЛИУ на основании схемы замещения /рис.5а/ можно получить нагрузочную характеристику импульсной и индукционной систем. Если нагрузку пучком отождествить с действием некоторого эффективного сопротивления, то на плато импульса для суммарного напряжения на секции U_{Σ} справедливо выражение

$$\frac{U_{\Sigma}}{U_{xx}} = 1 - \frac{J_b}{J_{кз}} \quad /1/$$

Здесь $U_{xx} = \frac{2U_0}{1 + \rho_0 / R_{cp}}$ - суммарное напряжение на секции в отсутствие пучка; $2U_0$ - действующее напряжение генератора; ρ_0 - внутреннее сопротивление генератора; R_{cp} - среднее динамичес-

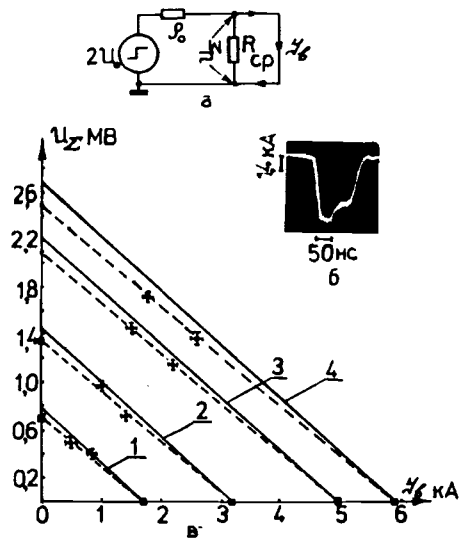


Рис.5. а - схема замещения ускоряющей секции; б - осциллограмма импульса максимального тока короткого замыкания секции; в - нагрузочные характеристики при различных зарядных напряжениях модулятора: 1 - $U_3 = 20$ кВ; 2 - $U_3 = 30$ кВ; 3 - $U_3 = 40$ кВ; 4 - $U_3 = 50$ кВ.

кое сопротивление индукторов секции; J_b - ток пучка; $J_{кз}$ - ток короткого замыкания секции, равный $2U_0 / \rho_0$. В нашем случае $\rho_0 = R_{ср} \approx 0,75$ Ом. На рис.5б показана характерная осциллограмма импульса максимального тока короткого замы-

кания ускоряющей секции. Измеренные нагрузочные характеристики исследуемой секции /при различных зарядных напряжениях U_3 накопительной емкости модулятора/ показаны на рис.5в. Суммарное напряжение на секции U_{Σ} , измерялось как на холостом ходу, так и при нагрузке секции резисторами. Ток в нагрузке измерялся поясом Роговского. Максимальный ток в нагрузке измерялся при закорачивании секции медным стержнем диаметром 6 мм, расположенным по оси камеры. При всех измерениях нагрузочных характеристик величина B_z составляла $\sim 0,7$ Тл. На рис.5в сплошными линиями показаны соответствующие нагрузочные характеристики, рассчитанные по формуле /1/. Представленные результаты дают достаточно хорошее совпадение рассчитанных и измеренных нагрузочных характеристик. Расхождение между ними объясняется остаточным влиянием магнитного поля на индукторы и имеющимся небольшим разбросом моментов срабатывания шести оконечных каскадов модулятора.

3. ЭЛЕКТРОННЫЙ ИСТОЧНИК

Электронный источник /ЭИ/ со взрывозамощенным трубчатым катодом размещен в первой трети ускоряющей секции /рис.1/. Катод /К/ и анод /А/ выполнены из графита. В диоде предусмотрены возможности:

- изменять диаметр катода от 5 до 20 мм;
- изменять расстояние анод-катодного промежутка от 0 до 15 см;

- взаимной юстировки катода и анода относительно оси катушек ведущего магнитного поля.

Диэлектрическая ускоряющая трубка /5/ диаметром 120 мм состояла из трех частей длиной ~ 60 см каждая. Между первой и второй частями размещался анодный узел /рис.1/. Он выполнен из графитового анодного диска /А/ с отверстием $\phi 15$ мм, толщиной стенки 7 мм и отрезка трубы из титана /6/ длиной ~ 100 мм и толщиной стенки 0,8 мм. Такой же отрезок титановой трубы соединяет вторую часть трубки с третьей. Эти отрезки обеспечивают герметичное соединение всех частей ускоряющей трубки /5/ при помощи эпоксидного компаунда К - 400, а также электрический контакт анода /А/ с корпусом индуктора.

Импульсное ускоряющее напряжение в ЭИ формируется шестью первыми индукторами секции и суммируется на металлическом катододержателе /7/. Возбуждение первых шести индукторов осуществляется от первых двух оконечных каскадов модулятора.

Для измерения полного тока в диоде использовался шунт $R_{ш}$. Ток ускоренного в секции трубчатого пучка измерялся с помощью цилиндра Фарадея /ЦФ/, расположенного в переходной камере. Амплитуда и форма ускоряющего напряжения измерялись высокоомными делителями, расположенными на высоковольтных изоляторах индукторов /по одному делителю на каждый из шести выходных каскадов модулятора/. При суммировании сигналов с шести делителей на специальной схеме измерялись параметры суммарного ускоряющего напряжения U_{Σ} на всей секции.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПУЧКОМ

Размер поперечного сечения пучка регистрировался в ПК и ДС с помощью отпечатков на луженой жести. Характерный отпечаток, соответствующий диаметру катода, показан на рис.6а /диаметр 14 мм, толщина $\sim 0,8$ мм/. При изменении величины B_z на катоде можно было получать трубчатые пучки с различной степенью компрессии /рис.6б и в/ в области однородного магнитного поля ДС и тем самым согласовывать размеры пучка с размерами различных ЭДС без замены катода.



Рис.6. Отпечатки пучка на мишени.

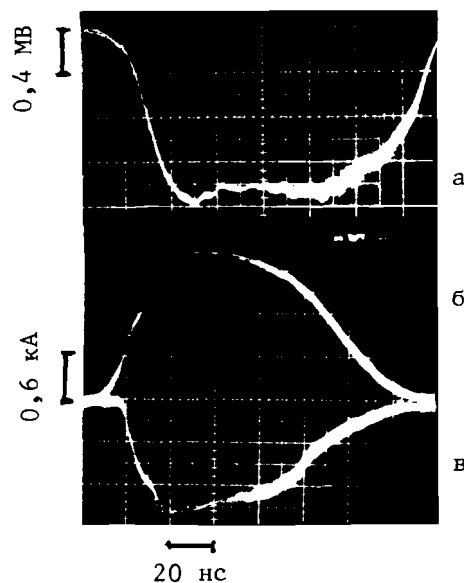


Рис.7. а - импульс суммарного напряжения на ускоряющей секции; б - осциллограмма тока в диоде; в - осциллограмма тока на выходе из секции.

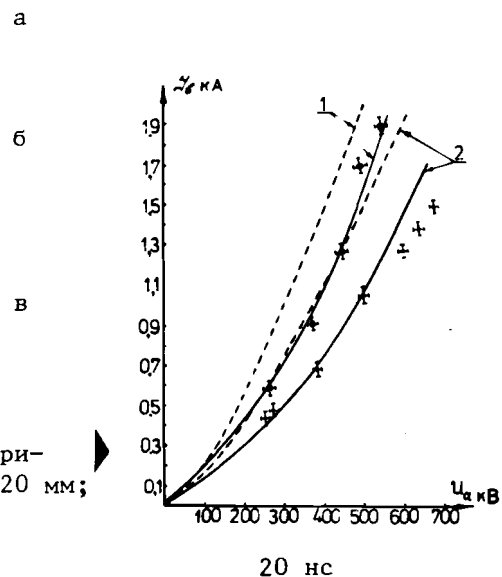


Рис.8. Вольт-амперные характеристики диода: кривые 1 - $d = 20$ мм; кривые 2 - $d = 55$ мм.

После срабатывания тиратрона одновременно в стробе ~ 20 нс регистрировалось суммарное напряжение на секции /рис.7а/, ток в диоде /рис.7б/ и на ЦФ /рис.7в/. Различие в этих токах /рис.7б и в/, по-видимому, связано с тем, что часть тока в диоде замыкается на анод.

Статистическая обработка информации в режиме "on line" производилась с помощью ЭВМ "Правец-16". Измерения показали, что нестабильность суммарного сигнала ускоряющего напряжения и ускоряемого тока не превышает $\pm 5\%$.

На рис.8 показаны измеренные вольт-амперные характеристики диода для двух различных анод-катодных расстояний d . Одновременно в стробе измерялись ускоряющее напряжение на диоде U_a и ток в диоде J_b . Систематическая ошибка в этих измерениях не более 3%. Сплошные кривые 1 и 2 /соответственно, $d = 20$ мм и $d = 55$ мм/ рассчитаны способом, приведенным в работе /4/, где рассматривается формирование электронного потока в коаксиальной пушке в сильном продольном магнитном поле. При расчете учтено, что при $d = 55$ мм радиус внешней трубы равен радиусу внутреннего витка фокусирующих катушек / $R = 85$ мм/, а при $d = 20$ мм радиус экранировки катода определяется конструкцией

анода и составляет $R = 45$ мм. Из рис.8 видно, что согласие расчетных кривых с экспериментальными результатами удовлетворительное.

Пунктирные кривые 1 и 2 соответствуют рассчитанным по формуле

$$J_{\max} = \frac{I_A}{2} \cdot \frac{(\gamma_R^{2/3} - 1)^{3/2}}{\ln R/b} \quad /2/$$

значениям предельного тока транспортировки. Здесь $I_A = 17$ кА,

$$\gamma_R = 1 + \frac{e\phi}{m_0 c^2}; \quad \phi - \text{ потенциал стенки канала, } b - \text{ радиус пучка, } m_0, e - \text{ масса покоя и заряд электрона, } c - \text{ скорость света.}$$

На рис.9 показана измеренная зависимость энергии ускоренного в секции пучка от ускоряющего напряжения на секции /кривая 1/. Пунктирной прямой показана биссектриса первого квадранта плоскости координат. Кривая 2 рассчитана согласно /4/ с учетом того, что кинетическая энергия электронов γ_b отличается от заданной полной энергии электронов в диоде γ_R на величину разности потенциала между границей пучка и стенкой камеры, пропорциональной полному току /5/

$$\gamma_R = \gamma_b + \frac{2 \cdot \tilde{I}_b}{\beta_{||}} \cdot \ln R/b. \quad /3/$$

Здесь \tilde{I}_b - ток пучка в единицах $I_A = 17$ кА, $\beta_{||}$ - продольная скорость пучка. Измерение энергии ускоренного пучка электронов на выходе секции проводилось с помощью пробегной методики, аналогичной приведенной в /6/.

На рис.10 показан один из измеренных энергетических спектров ускоренного пучка. Измерение параметров секции и сигналов с восьми-фольгового датчика также проводилось в одном импульсе в стробе с последующей статистической обработкой на ЭВМ. Ошибка в измере-

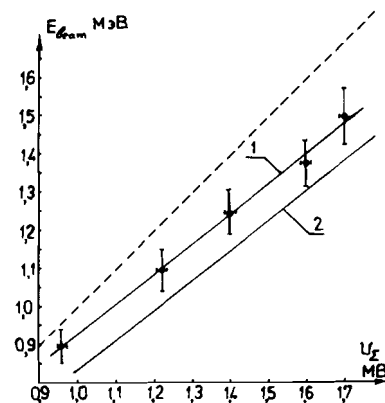


Рис.9. Зависимость энергии ускоренного пучка электронов от суммарного ускоряющего напряжения на секции.

$N(E)$, отн. ед.

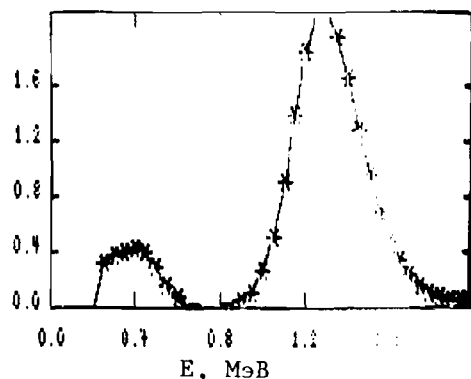


Рис.11. Зависимость мощности в пучке от зарядного напряжения на накопительной емкости модулятора для случая $d = 55$ мм.

нии энергии связана, в основном, с неточностью в калибровке детектора и составляет $\pm 5\%$.

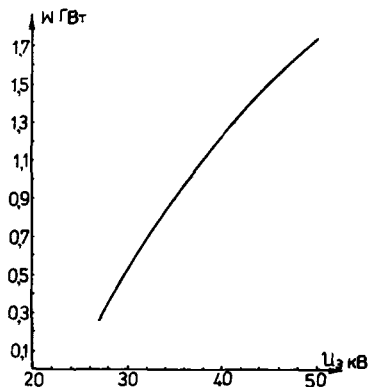
Для выяснения погрешностей измерений энергии ускоренных электронов, вносимых пространственным зарядом пучка, были проведены измерения энергии на уровне тока $\sim 0,25$ от номинала. Пучок диафрагмировался в переходной камере. В пределах погрешности методики энергии полного и коллимированного пучка не отличались друг от друга. Максимальная измеренная энергия пучка составляет 1,5 МэВ при суммарном напряжении на секции 1,7 МВ.

Максимальную расчетную мощность, которую секция способна вложить в пучок, можно оценить из измеренных нагрузочных характеристик /рис.5, кривая 4/ и энергии пучка. Такая оценка дает величину /для тока ~ 3 кА/ $W_{\max} \approx 3$ ГВт. На рис.11 показана рассчитанная из полученных экспериментальных данных зависимость мощности в пучке от зарядного напряжения на накопительной емкости модулятора /в режиме, когда анод-катодное расстояние $d = 55$ мм/. Максимальная мощность в пучке в наших экспериментах была получена в режиме, когда $d = 20$ мм, и составляла 2 ГВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате увеличения мощности модулятора в 1,5 раза /до 7,5 ГВт/, применения согласующих устройств и использования экранировки пермалловых сердечников суммарное напряжение

Рис.10. Измеренный энергетический спектр ускоренного пучка.



на секции ЛИУ увеличено с 0,8 до $1,7 \div 1,8$ МВ при токе пучка на выходе $1,3 \div 1,5$ кА. При этом длительность плато импульса напряжения составляет ~ 60 нс.

Экспериментально показано, что кинетическая энергия ускоренного пучка электронов в исследуемой секции ЛИУ отличается от суммарного напряжения на секции примерно на величину разности потенциала между границей пучка и стенкой камеры, пропорциональную полному току пучка J_b . Этот эффект необходимо учитывать в широкоапертурных сильноточных ЭИ ЛИУ.

Измеренная максимальная энергия ускоренных в секции электронов составляет $E = 1,5$ МэВ; максимальная полученная экспериментально мощность в пучке $W \approx 2$ ГВт; максимальная напряженность электрического поля в режиме ускорения, полученная на последних 2/3 длины секции /без учета диода/, составляет $E_z = 10$ кВ/см.

Измеренные вольт-амперные характеристики диода хорошо согласуются с кривыми, рассчитанными на основании теории формирования электронных потоков в коаксиальной пушке в сильном продольном магнитном поле.

КПД исследуемой ускоряющей секции ЛИУ при зарядном напряжении на накопительной емкости модулятора $U_3 = 50$ кВ и $d = 20$ мм /отношение энергии в электронном пучке к энергии, запасенной в модуляторе/ составляет $\sim 13\%$.

Измеренные нагрузочные характеристики секции незначительно отличаются от расчетных. Максимальный измеренный ток короткого замыкания секции составляет $\sim 5,9$ кА. Оптимальное расчетное значение тока пучка, при котором достигается максимальная мощность $W \approx 3$ ГВт, составляет ~ 3 кА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов В.И. и др. - ЖТФ, 1987, т.57, № 6, с.1213.
2. Александров В.С. и др. - В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, Д9-87-105, Дубна: ОИЯИ, 1987, с.193.
3. Аверьянов В.И. и др. - В Сб. аннотаций докладов на XI Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Р9-88-738, Дубна: ОИЯИ, 1987, с.148.
4. Нечаев В.Е. - Физика плазмы, 1979, т.5, № 3, с.706.
5. Воронин В.С. и др. - В Сб. докладов на 2 Смп. по коллективным методам ускорения, Р9-10500, Дубна: ОИЯИ, 1977, с.219.
6. Дергозубов К.А. и др. - ПТЭ, 1975, № 1, с.29.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 августа 1989 года.