

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



9/1-78

P9 - 10999

A-742

П.С. Анцупов, А.В. Андросов, В.М. Божков, В.Н. Быков,  
В.В. Журавлев, В.Б. Заббаров, В.С. Кладницкий,  
Ю.Н. Комендантов, И.М. Матора, Л.А. Меркулов,  
Ю.А. Метелкин, Ю.Д. Петренко, В.А. Саввин,  
О.А. Стрелина, Р.В. Харьюзов, В.А. Швец

193/2-78

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ЭЭП-2

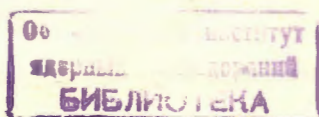
**1977**

Р9 - 10999

П.С.Анцупов, А.В.Андросов, В.М.Божков, В.Н.Быков,  
В.В.Журавлев, В.Б.Заббаров, В.С.Кладницкий,  
Ю.Н.Комендантов, И.М.Матора, Л.А.Меркулов,  
Ю.А.Метелкин, Ю.Д.Петренко, В.А.Саввин,  
О.А.Стрелина, Р.В.Харьюзов; В.А.Швец

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ЭЭП-2

*Направлено в журнал "Радиотехника и электроника"*



Анцупов П.С. и др.

P9 - 10999

Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2

Показано, что имеется удовлетворительное согласие эксперимента с теорией и методикой самосогласованного расчета осесимметричной электронной пушки с ламинарным потоком <sup>/3,4/</sup>.

Получены данные о динамическом снижении эмиссионной способности оксидного катода в течение короткого импульса.

Продемонстрирована возможность устранения электронов из нерабочей части импульса напряжения пушки токовым дефлектором, в котором спад отклоняющего поля происходит в течение 2 нс.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Antsupov P.S. et al.

P9 - 10999

Experimental Electron Gun EEP-2

Experiment is shown to agree satisfactorily with theory and methods of self-consistent calculation of the axessymmetrical electron gun with the laminar flow. The data on dynamic reduction of emission capability of oxide cathode during a short pulse were obtained. The possibility is demonstrated for eliminating electrons out of inoperative part of the gun voltage pulse by the current deflector in which the deflecting field decrease takes 2ns.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1977

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30 на энергию электронов 30 МэВ и ток 250 А была показана возможность полного устранения потерь ускоряемых в нем частиц при условии их инжекции в ускоритель в т.н. ламинарном потоке и небольшом разбросе по энергии <sup>/1,2/</sup>, и сочтено необходимым разработать систему такой инжекции.

В работах <sup>/3-6/</sup> дана теория и методика расчета осесимметричных электронных пушек с практически ламинарным потоком частиц на выходе. Ламинарность достигается посредством придания эмиттеру катода необходимой формы. Формирование ламинарных пучков оказалось возможным как в электронной пушке-диоде <sup>/3,4,6/</sup>, так и в пушке с установленной между катодом и анодом сеткой <sup>/5/</sup>.

Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2, выполненная по диодной схеме, предназначается для исследования электронно-оптических характеристик пучка и проверки их соответствия расчетным данным, а также для отработки способа монохроматизации электронов с помощью токового дефлектора <sup>/1,7,8/</sup>.

## §1. ПАРАМЕТРЫ ПУШКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Расчетные параметры ЭЭП-2 следующие: напряжение  $U = 500$  кВ, ток  $I = 250$  А при полной длительности импульса 2,5 мкс. На рис. 1 представлена конструктивная схема пушки.

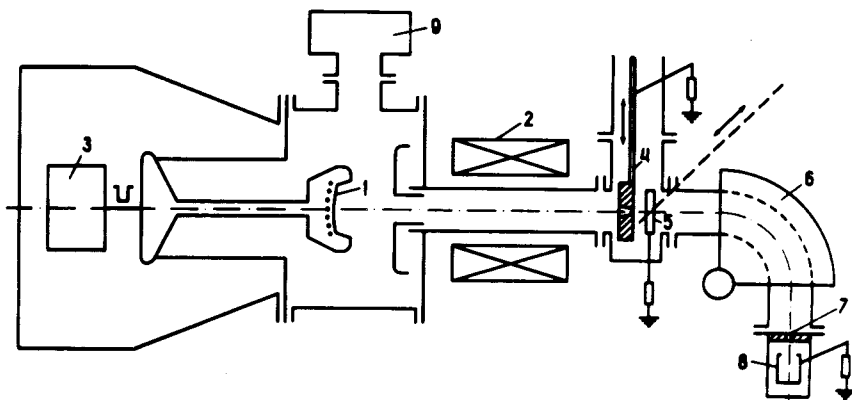


Рис. 1. Конструктивная схема ЭЭП-2.

Эмиттеру оксидного катода 1 придана форма, которая при напряжении и токе, близких к номинальным, в условиях пролета пучка в магнитном поле короткого не экранированного соленоида 2 (в центре соленоида поле  $H$  близко к 470 Э) и заданной конфигурации анода и других заземленных деталей обеспечивает ламинарность потока электронов на выходе пушки.

Импульс отрицательного напряжения на катод подается от погруженного в масло импульсного трансформатора 3 [9,10]. Выходной фланец бака трансформатора соединен с корпусом пушки.

Измерение радиального распределения плотности тока и эмиттанса пучка выполняется водоохлаждаемым токоприемником-коллиматором 4 с малым (диаметром 2,6 мм) отверстием и коллектором 5.

Коллиматор сконструирован так, что он практически полностью поглощает все падающие на него электроны, кроме прошедших сквозь отверстие, во всем диапазоне его управляемого с пульта вертикального перемещения ( $\pm 22$  мм). В среднем положении коллиматора оптическая ось пушки совпадает с осью его отверстия. Расстояние между коллиматором 4 и коллектором 5 равно 37 мм.

Коллектор имеет размер по вертикали, достаточный для перекрытия всего диапазона перемещения токоприемника-коллиматора и малый (6 мм) горизонтальный размер. Управляемое с пульта перемещение коллектора поперек пучка происходит в горизонтальном направлении.

При вертикальном движении токоприемника-коллиматора и неподвижном коллекторе исследуется радиальное распределение плотности тока в пучке. Если же коллиматор неподвижен, а смещается по горизонтали коллектор, то имеется возможность измерять угловую расходимость траекторий в струйке электронов, прошедших сквозь коллиматор.

Энергия прошедших через коллиматор электронов измерялась магнитным анализатором 6 с углом отклонения траекторий  $90^\circ$  и эффективным радиусом кривизны осевой траектории  $R = 138$  мм. Пройдя диафрагму 7, электроны попадали в цилиндр Фарадея 8, расположенный на расстоянии  $R$  от выходной границы магнита.

Чтобы избежать ошибок, обусловленных влиянием гистерезиса, всегда соблюдался стандартный порядок измерений: перед измерениями ток возбуждения магнита поднимали до уровня насыщения магнитопровода, и необходимые отсчеты производили при спадающем токе.

На осциллограмме сигнала с цилиндра Фарадея плоской вершине импульса тока электронной пушки отвечает широкий единственный пик. По мере дальнейшего снижения тока магнита регистрируются электроны с энергией, меньшей максимальной, и на осциллограмме наблюдаются два узких пика. С уменьшением энергии (тока магнита) временной интервал между этими пиками растет.

Точность измерения энергии электронов магнитным анализатором составляла 3-4%.

Во время работы токового дефлектора входной фланец корпуса токоприемника-коллиматора и коллектора расстыковывался, и дефлектор монтировался в образовавшийся промежуток. Дефлектор представляет собой цилиндр, к которому подведены две питающие его ударные обстреливательные линии <sup>11</sup>, оси которых перпендикулярны оси пушки. Соосно с дефлектором установлены два дополнительных соленоида.

## §2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. СОПОСТАВЛЕНИЕ ИХ С ТЕОРИЕЙ

Параметры электронного пучка были измерены в его сечении, удаленном от катода пушки на 36 см. В экспериментах не были достигнуты номинальные значения напряжения  $U$  и тока  $I$ . Для сравнения полученных результатов с теорией был рассчитан ход траекторий при значениях  $U, I$  и  $H$ , имевших место в экспериментах.

На рис.2 сопоставляются измеренные и рассчитанные распределения плотности тока  $j$  по диаметру пучка при  $U=272$  кВ и  $I=110$  А. На рис.3 они сопоставлены для случая  $U=364$  кВ и  $I=130$  А. Нетрудно видеть, что расчетное и экспериментальное распределения  $j(r)$  удовлетворительно согласуются. В частности, наблюдается предсказываемый теорией пик плотности тока вблизи границы пучка. Измеренные поперечники пучка во всех случаях отличаются от соответствующих расчетных величин не более чем на 18%.

Измеренные значения плотности тока при каждом положении коллиматора усреднены по площади его отверстия. Поэтому в той части сечения пучка, где плотность меняется резко, происходит сглаживание экспериментального распределения по сравнению с расчетным. Это заметно на границах пучка.

Теоретическое распределение плотности тока в заданном сечении пучка получается в результате совместного расчета хода многих траекторий, начинающихся на эмиттере катода. При каждом наборе экспериментальных значений  $U, I$  и  $H$  рассчитывалось по 16 траекторий. На рис. 4 изображены соответствующие вееры

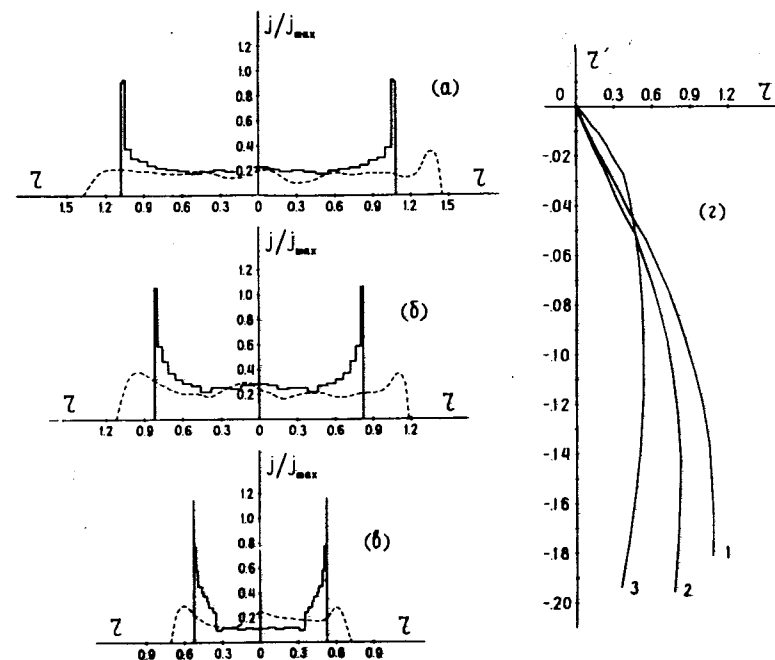


Рис.2. Распределение  $j(r)$  для  $U=272$  кВ,  $I=110$  А (пунктир - эксперимент, сплошная линия - теория,  $r$  в см.,  $r'$  в рад.) а)  $H=364$  Э, б)  $H=380$  Э, в)  $H=403$  Э, г) проекции фазовых объемов ( а ) + ( б ).

траекторий для  $U=272$  кВ, но не полностью, а по 9 траекторий. Не изображенные траектории намечены в виде их коротких начальных отрезков у эмиттера катода. Параметром вееров является значение фокусирующего магнитного поля  $H$  в центре соленоида. Несмотря на существенное отличие  $U$  и  $I$  от номинальных величин, ламинарный характер потока электронов в основном сохраняется в широком интервале значений  $H$ . Лишь при фокусирующем поле  $H=403$  Э, которое существенно

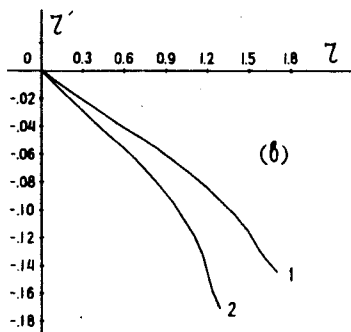
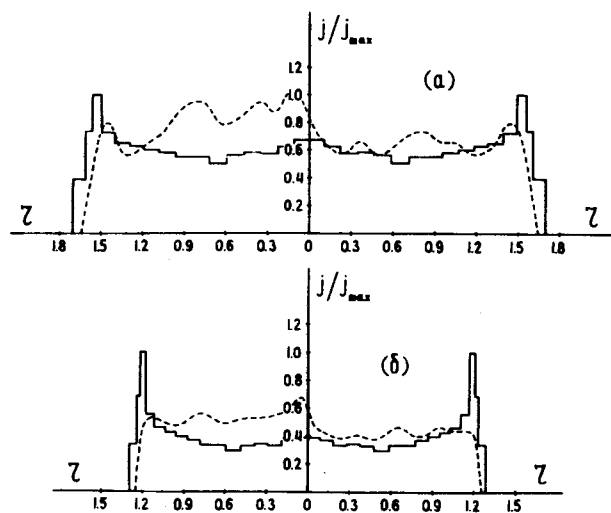


Рис. 3. Распределение  $j(r)$  для  $U=364$  кВ,  $I=130$  А, (пунктир - эксперимент, сплошная линия - теория,  $r$  в см.,  $r'$  в рад.),  
а)  $N=385$  Э, б)  $N=412$  Э,  
в) проекции фазового объема (а) и (б).

выше, чем необходимо для этих энергий и тока электронов, периферические траектории электронов пересекаются.

В ходе измерений шаг перемещения коллиматора составлял 1 мм., а точность отсчета его радиального положения была не хуже 0,1 мм. Отсчет величины тока коллектора производился с помощью осциллографа в тот момент, когда напряжение пушки и полный ток электронного пучка имели максимальные значения. В каждой

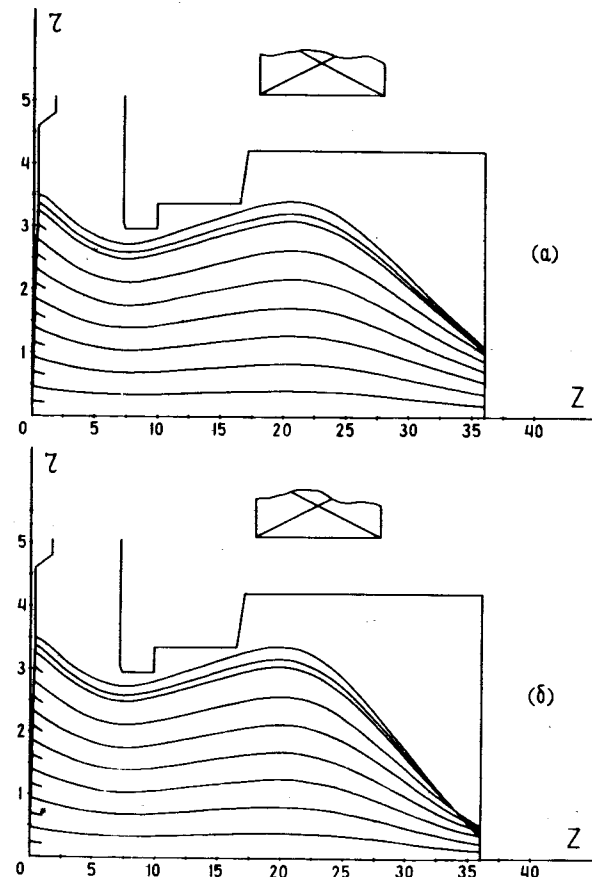


Рис.4. Веер траекторий для  $U=272$  кВ,  $I=110$  А ( $z$  и  $r$  в см.)  
а)  $N=364$  Э б)  $N=403$  Э.

серии измерений дважды контролировалась максимальная энергия электронов: при положении отверстия коллиматора на оси пушки и при его крайнем положении.

За время измерения радиального распределения плотности тока энергия не менялась сколько-нибудь заметно.

С помощью магнитного анализатора оказалось возможным исследовать поведение эмиссионной способности катода в течение импульса. Методика состоит в следующем.

В различные моменты времени вблизи максимума напряжения и тока эмиссии с катода, полностью попадавшего на токоприемник-коллиматор, измерялись значения напряжения (энергия электронов). Результатом этого измерения является кривая 1 на рис.5 (шкала напряжений слева).

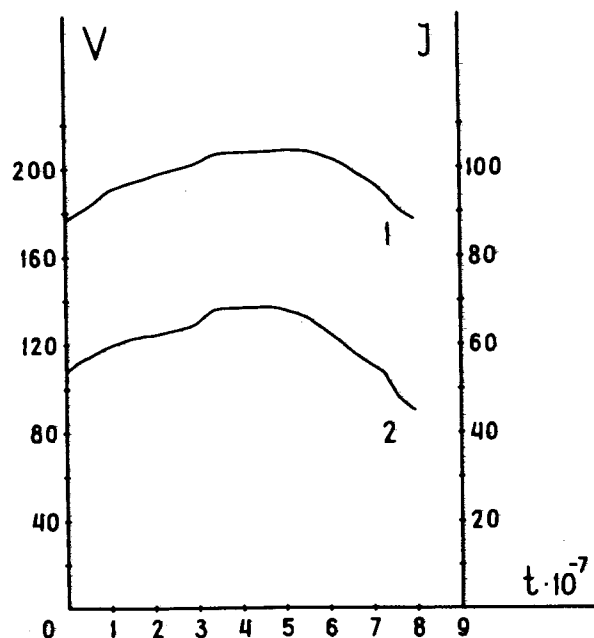


Рис.5. Динамическая вольт-амперная характеристика оксидного катода в рабочей части импульса и ее окрестности ( $t$  - с.,  $U$  - кВ,  $I$  - А).

В эти же моменты времени относительно начала импульса были измерены мгновенные значения тока эмиссии, падавшего на токоприемник (кривая 2 и соответствующая ей правая шкала). То, что ток эмиссии совпадает с током на токоприемник, было проверено с помощью пояса Роговского, охватывавшего катодную ножку пушки. Далее, проектируя моменты времени, при которых имели место равные напряжения на верхней кривой, на нижнюю кривую и сравнивая значения токов в каждой такой паре временных точек, всегда можно было видеть, что в последующих точках ток меньше, чем в предыдущих.

На рис. 6 показана зависимость снижения эмиссионной способности катода  $\delta I$  от величины времени запаздывания.

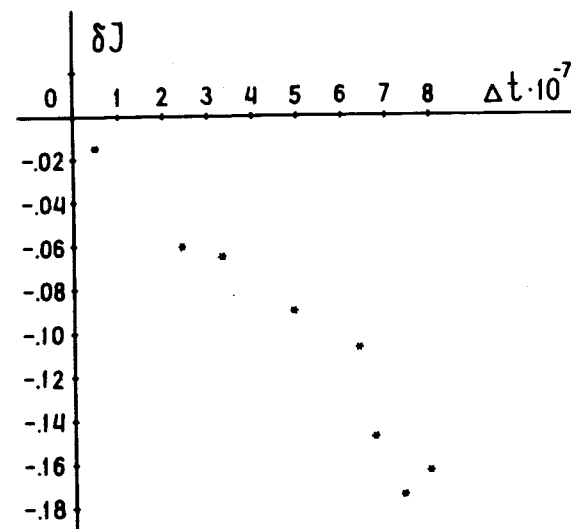


Рис.6. Снижение эмиссионной способности катода во время импульса ( $\Delta t$  - с.,  $\delta I = \frac{I_{\text{пред.}} - I_{\text{посл.}}}{I_{\text{пред.}}}$ ).

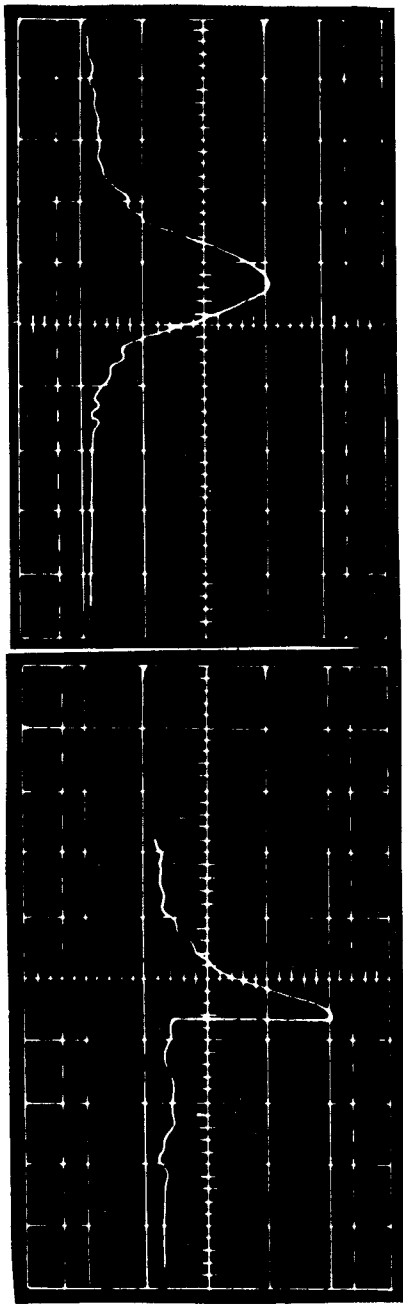


Рис. 7. Осциллограмма тока пучка на токоприемник-коллиматор. Слева - дефлектор не запитан, справа - запитан (одно большое деление шкалы времени - 1 мкс.).

Определенно видно, что в течение микросекунды наш оксидный катод при амплитуде тока эмиссии  $\sim 70$  А теряет эмиссионную способность примерно на 20%.

Были также проведены предварительные испытания работы импульсного дефлектора, результат которых показан на рис. 7. Отклоняющий токовый импульс, подаваемый синхронно с импульсом пушки на дефлектор, вызывал отклонение электронов на водоохлаждаемый токоприемник, расположенный внутри вакуумной камеры дефлектора.

На рис. 7 видно, как из невозмущенного импульса тока на токоприемник-коллиматор (левый снимок) после подачи отклоняющего токового импульса с амплитудой 320 А электроны начальной части импульса пушки отклоняются и более чем на 90% поглощаются внутри дефлектора, не достигнув токоприемника-коллиматора (правая осциллограмма). Исчезновение отклоняющего поля происходит менее чем за 2 нс., и последующие электроны импульса пушки проходят сквозь дефлекторную секцию беспрепятственно.

Испытания подтвердили возможность отклонения электронов с наносекундными временами спада отклоняющего поля. В этих испытаниях работал дефлектор 1-го канала системы монохроматизации<sup>/8/</sup>, схема формирования которого содержит тройниковое разветвление и вследствие этого имеет вдвое меньший рабочий ток, чем во втором канале.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика И.М.Франка за интерес к работе и помощь, а также В.Л.Карповского, Б.П.Никонова, Э.В.Лобову, Ю.С.Язвицкого, В.Д.Ананьева, Б.И.Воронова, Н.А.Мацуева, И.М.Столетову, В.М.Крылова, Л.Г.Орлова, Б.Ф.Дыбина, В.М.Плотко, А.И.Аваева, Е.А.Баскова, Б.Г.Дубинкина, М.Г.Зайцева, В.В.Карпухина, В.И.Котова, О.В.Плешукова, Б.А.Биткина и др. за активное участие в работах по созданию ЭЭП-2.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Матора И.М., Меркулов Л.А., Шелонцев И.И. ОИЯИ Р9-5268, Дубна, 1970; ЖТФ, 1971, 41, 7, 1469.
2. Вахрушин Ю.П., Иванов Н.И., Иванов О.Л., Кузнецов В.С., Матора И.М., Меркулов Л.А., Никольский М.А., Фидельская Р.П., Шелонцев И.И. ОИЯИ Р9-5714, Дубна, 1971.
3. Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ Р9-9476, Дубна, 1976; Радиотехника и электроника, 22, 6, 1246, 1977.
4. Матора И.М., Меркулов Л.А., ОИЯИ Р9-9818, Дубна, 1976.
5. Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ Р9-10504, Дубна, 1977.
6. Матора И.М., Меркулов Л.А. ОИЯИ Р9-10670, Дубна, 1977.
7. Швец В.А. ОИЯИ 13-9077, Дубна, 1975.
8. Швец В.А. ОИЯИ 9-10301, Дубна, 1976.
9. Анцулов П.С., Матора И.М. Авт. свид. № 457109, Бюлл.ОИПОТЗ, 1975, №2. с. 101.
10. Анцулов П.С., Матора И.М., Швец В.А. ОИЯИ Р13-9276, Дубна, 1975; ПТЭ, 4, 137, 1976.
11. Харьюзов Р.В., Швец В.А. ОИЯИ 13-8709, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 октября 1977 года.