

М-345



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-80-429

**МАТОРА**

**Иван Максимович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ИНЖЕКТОРОВ  
ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ**

**Специальность 05.09.04 - электрофизические  
установки и ускорители**

**Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук**

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики  
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор Игорь Александрович Гришаев

доктор технических наук  
старший научный сотрудник Леонид Петрович Зиновьев

доктор физико-математических наук  
профессор Николай Николаевич Семашко

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Физический институт АН СССР им. П.Н.Лебедева, Москва.

Защита состоится " " \_\_\_\_\_ 1980 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании Специализированного совета Д.047.01.02 при  
Лаборатории высоких энергий Объединенного института  
ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1980 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета

М.Ф.Лихачев

## Введение

Эффективность фундаментальных и прикладных научных исследований в ядерной физике в настоящее время в решающей степени зависит от качества базовых установок, предназначенных для генерации пучков микрочастиц, необходимых экспериментаторам.

Стоимость современных источников такого рода, как правило, достигает многих миллионов рублей, и имеется тенденция её роста.

Вместе с тем следует отметить два предложения, реализация которых открыла путь к созданию установок, имеющих наряду с первоклассными параметрами основного назначения также и высокую экономичность.

В 1955 г. Д.И.Блохинцев выдвинул идею создания импульсного реактора периодического действия на быстрых нейтронах, которая через пять лет была реализована совместными усилиями сотрудников Физико-энергетического института (г. Обнинск) и ОИЯИ (г. Дубна) при участии ряда предприятий и институтов СССР\*.

Первый в мире реактор этого типа, пущенный 23 июня 1960 г. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, был назван ИБР. Этот источник, на первый взгляд, незначительной средней мощности (1-6 кВт) для ядерно-физических исследований методом нейтронной спектроскопии по времени пролёта оказался эквивалентным мощному стационарному реактору на среднюю мощность в несколько МВт.

Вторая не менее ценная и эффективная идея была предложена И.М.Франком и Ф.Л.Шапиро\* в том же 1960 г., когда началась успешная эксплуатация ИБРа, в виде способа сокращения более чем на порядок длительности нейтронных импульсов в ИБРе при его работе в качестве т.н. импульсного бустера. В этом режиме работы реактор остаётся всегда подкритическим, но должна происходить модуляция его реактивности за счет вращения подвижной части зоны. В моменты максимумов реактивности в центре реактора ускорителем-инжектором генерируется короткая вспышка нейтронов, которые размножаются в активной зоне ИБРа в сотни раз.

В 1961 г. работы по созданию инжектора ИБРа - микротрона возглавил автор.

В конце 1964 - начале 1965 гг. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ вступил в строй действующих установок новый источник коротких вспышек нейтронов - импульсный бустер "ИБР+микротрон"/1-4/

\* Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.

50 раз в секунду электронные импульсы от ускорителя с энергией электронов 26-30 МэВ, импульсным током 60-80 мА и длительностью 1,3-2,3 мкс бомбардировали расположенную в центре подкритической активной зоны ИБРА урановую мишень и генерировали на ней нейтронные вспышки той же длительности <sup>15/</sup>. Импульсы посылались на мишень синхронно с модуляцией реактивности зоны точно в моменты максимумов её реактивности,  $K_{эфф} \in (-10^{-2} - (5 \times 10^{-3}))$ , что обеспечивало, с одной стороны, умножение числа порожденных электронами нейтронов каждой вспышки в 100-200 раз при одновременном увеличении полудлины до 3-4 мкс и, с другой стороны, подавление фона запаздывающих нейтронов между вспышками.

Сравнительная таблица параметров ИБРА и импульсного бустера "ИБР-микротрон" при обычной для них частоте следования импульсов 50 Гц дается ниже.

Таблица I

	ИБР	ИБР + микротрон
Средняя мощность (кВт)	6	1
Пиковый поток нейтронов в телесный угол 4 $\pi$ (нейтр/с)	$1,3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$
Средний поток нейтронов в телесный угол 4 $\pi$ (нейтр/с)	$3,5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{13}$
Число нейтронов в импульсе	$7 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$
Длительность нейтронного импульса на полувысоте (мкс)	56	3

Особенно привлекательным в работе первой в мире установки этого рода явилось не только сокращение более чем на порядок длительности импульса нейтронов, но также одновременный существенный рост пикового потока нейтронов по сравнению с самим ИБРом. Эти преимущества наряду с уже упомянутым подавленным фоном между импульсами делают комплекс "ИБР + ускоритель" высокоэффективным и перспективным источником нейтронов как для исследовательских работ, базирующихся на методе времени пролёта, так и для прикладных работ, в которых необходимы кратковременные, но мощные нейтронные воздействия.

Режим эксплуатации ускорителя, при котором периоды непрерывной многосуточной работы бустера перемежались периодами пример-

но такой же длительности работы на экспериментальные исследования одного ИБРА в реакторном режиме, благоприятствовал проведению интенсивных теоретических <sup>15-7/</sup> и экспериментальных <sup>2,4,5,7-13/</sup> исследований микротрона, на основе которых был разработан и реализован ряд важных его усовершенствований.

Всё это позволило получить на нём при его непрерывной многосуточной работе рекордные параметры пучка для этого класса ускорителей: ток электронов на мишень реактора 80 мА при их энергии 30 МэВ <sup>15/</sup>, не превзойденные до настоящего времени.

Вскоре после экспериментального подтверждения высокой эффективности импульсного бустера "ИБР-микротрон", в 1964-65 гг., началось проектирование 4-мегаваттного ИБР-2 и подходящего для него инжектора - предложенного автором линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30 на энергию электронов 30 МэВ, ток в импульсе 250 А, длительность импульса 0,5 мкс, частоту следования 50 Гц и среднюю мощность пучка 200 кВт <sup>14,15/</sup>. Создание этого в 1000 раз более мощного, чем первый импульсный бустер, комплекса требует, разумеется, не менее 15 лет. Поэтому одновременно в 1966 г. силами Лаборатории был спроектирован промежуточный по мощности реактор ИБР-30 на 25-30 кВт, который установлен вместо ИБРА, причем бывший зал микротрона надстроен, и в нём вертикально установлен предложенный Б.Н.Буниним электронный инжектор - резонансный линейный ускоритель ЛУЭ-40\*. Электронно-оптический тракт микротрона использован для транспортировки пучка от ЛУЭ-40 на мишень ИБР-30 без изменений.

В 1970 г. на втором импульсном бустере "ИБР-30 + ЛУЭ-40" начались нейтронно-физические исследования, продолжающиеся поныне.

В 1977 г. выполнена критическая сборка ИБР-2 без натриевого охлаждения активной зоны. Выход реактора на мощность 4 МВт ожидается в ближайшие два года.

Уже изготовлен инжекторный участок ЛИУ-30, обеспечивающий приток энергии электронов 3 МэВ, идет изготовление остальных его участков и завершается строительство здания ускорителя.

Основные параметры всех дубненских импульсных бустеров даны в табл. 2.

Разработка физических основ ЛИУ-30 начата была автором в 1965 г. Проект ускорителя и тракта ввода пучка в ИБР-2 разработан совместно сотрудниками Научно-исследовательского института

\* Бунин Б.Н. и др. ОИЯИ, И3-6213, Дубна, 1972.

электрофизической аппаратуры им. Д.В. Биремова и ЛФФ ОИЯИ при научном руководстве автора /14-16, 18-37/.

Таблица 2

	ИБР + микротрон	ИБР-30 + ЛУЭ-40	ИБР-2 + ЛИУ-30
Время работы	64-68 гг.	с 1970 г.	проект
Частота следования импульсов (Гц)	50	100	50
<u>Реакторный режим</u>			
Пиковый поток нейтронов в угол 4Г (нейтр/с)	$1,2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{19}$
Средний поток нейтронов в угол 4Г (нейтр/с)	$3,5 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{17}$
Средняя тепловая мощность (кВт)	6	25	4000
Время жизни поколения быстрых нейтронов в зоне (с)	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
Полуширина нейтр.вспышки(мкс)	56	70	92
Качество нейтр.источн.(нейтр/с <sup>3</sup> )	$1,1 \cdot 10^{23}$	$2,9 \cdot 10^{23}$	$2 \cdot 10^{25}$
<u>Бустерный режим</u>			
Длительность электр.имп.(мкс)	1,3-2,3	1,6	0,5
Импульсный ток электронов (А)	0,06-0,08	0,25	250
Энергия электронов (МэВ)	30	44	30
Сред.мощность электр.пучка (кВт)	0,2	1,7	200
Материал мишени	$^{238}\text{U}$	W	W
Умножение	100-200	150-200	100
Средняя тепловая мощность(кВт)	1	12	440
Средний поток нейтр. в угол 4Г (нейтр/с)	$6 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{16}$
Пиковый поток нейтронов в угол 4Г (нейтр/с)	$4 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{18}$	$1,7 \cdot 10^{20}$
Полуширина нейтр.вспышки (мкс)	3	4	3
Качество нейтр.источника (нейтр/с <sup>3</sup> )	$6,7 \cdot 10^{24}$	$4,4 \cdot 10^{25}$	$2,8 \cdot 10^{27}$
Число нейтронов во вспышке	$1,2 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{14}$

В диссертации приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований и разработок по электронным инжек-

торам для импульсных реакторов на быстрых нейтронах ИБР и ИБР-2 и результаты первой в мире успешной демонстрации работы импульсного бустера "ИБР+микротрон", относящиеся к его инжектору, полученные автором или под его руководством.

#### Глава I. Инжектор первого дубненского импульсного бустера - микротрон

Тракт, транспортировавший электроны от выводного магнитного канала, установленного на последней орбите микротрона, до мишени ИБРа, был сделан прямолинейным. Фокусировка и нацеливание центра тяжести фокусного пятна пучка на ось цилиндрической урановой мишени выполняется единственным дублетом четырехполюсных магнитных линз, расположенным на середине тракта - под потолком зала реактора (рис. 1). Нацеливание осуществляется простейшим устройством для дистанционного, контролируемого с пульта реактора поперечного перемещения каждой из линз. Ось тракта вертикальна.

Эта композиция требовала и вертикальной установки медианной плоскости магнита микротрона, причем преимущество в надёжности бустера в этом случае оправдывало необходимость преодоления возникших дополнительных трудностей размещения оборудования.

В бетонном 2-метровой толщины потолке зала реактора имеется защитный шибер, отрывающийся и закрывающийся без нарушения вакуума в электроновом вводе. При закрытом его положении проникновение любой радиации в зал микротрона из зала реактора исключается. Этим обеспечивалась возможность экспериментального исследования и совершенствования микротрона в периоды, когда ИБР работал в реакторном режиме.

В микротроне, проект которого разработан был совместно сотрудниками Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ и Физической лаборатории Института физических проблем АН СССР им. С.И.Вавилова<sup>4/</sup>, использовался т.н.второй режим ускорения, предложенный С.П.Капицей и В.Н.Мелехиным<sup>5/</sup>.

Важными его преимуществами являются вдвое больший, чем обычно, уровень напряженности  $H$  постоянного магнитного поля ( $\gamma$  у нас было  $H \sim 2200 \text{ Э}$ ), благодаря чему был многократно снижен вес магнита; набор электронами энергии на каждом обороте  $\sim 1 \text{ МэВ}$ , так что 30 МэВ они приобретали всего на 30 оборотах; а также высокая интенсивность пучка.

<sup>5/</sup> Капица С.П. и др. ЖЭТФ, 1960, 39, с.997.

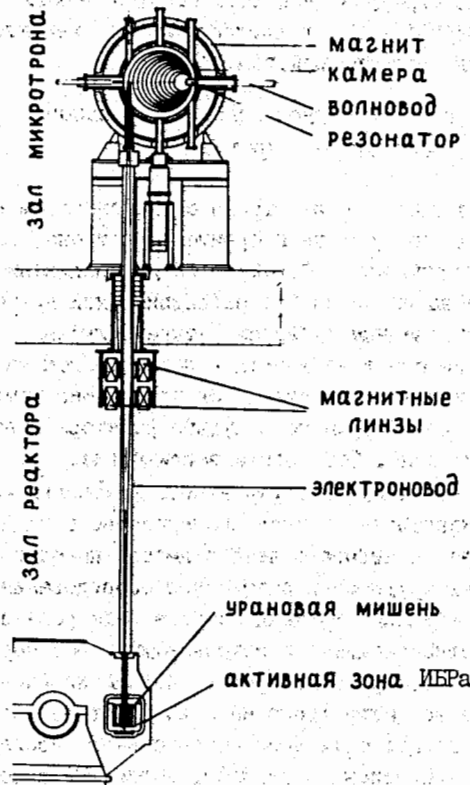


Рис. 1

Автором был проведён теоретический анализ поведения решений уравнений движения электронов в микротроне и выполнены совместно с Л.А. Меркуловым и И.И. Шелонцевым расчеты процесса ускорения по всем орбитам на ЭВМ /6/. Рассматривалось движение частиц в медианной плоскости магнита. СВЧ полями рассеяния в пролётных окнах резонатора и радиационными потерями энергии электронов на круговых орбитах пренебрегалось.

С помощью методики, предложенной в /38/, было показано, что из-за наличия в резонаторе микротрона наряду с однонаправленным ускоряющим электрическим полем также и мощного магнитного СВЧ

поля, меняющего величину заворачивающего постоянного поля магнита на внутррезонаторных отрезках орбит, ускорение практически всегда сопровождается дрейфом орбит в направлении, перпендикулярном т.н. их общему диаметру, вследствие чего это традиционное понятие в классическом микротроне является условным. На рис. 2 (координата  $\bar{Y}$  центра кривизны относительно "общего диаметра орбит"

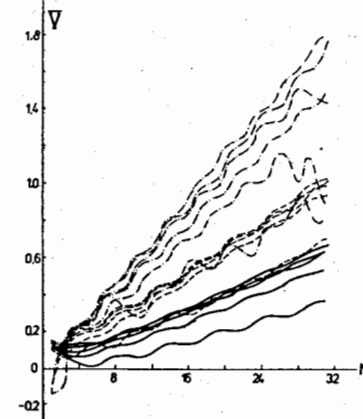


Рис. 2

взята в безразмерных единицах, в которых величина 0,68 соответствует 1 см) дан рассчитанный в /6/ ход  $\bar{Y}$  с номером N орбит. Видно, что удаление центров от "общего диаметра" достигает 2,5 см. При этом к концу ускорения возникает неустрашимый разброс  $\bar{Y}$  орбит резонансных электронов для любого фиксированного набора параметров ускорения (кривые  $\bar{Y}(N)$  различных орбит каждого такого набора графически одинаковы). Это приводит к неизбежному радиальному угловому разбросу траекторий пучка на входе в магнитный канал, который в нашем случае для номинального набора параметров ускорения составлял  $\sim 0,015$  радиан. Вместе с тем координата  $\bar{Y}_{cp}$  центра кривизны и осевой траектории пучка не равна нулю. Выраженная в миллиметрах, она представлена на рис. 3 в зависимости от уровня напряженности постоянного магнитного поля, пропорционального  $\Omega$  ( $N=2200$  э для  $\Omega = 1,96$ ), и амплитуды  $\epsilon$  ускоряющего напряжения, пропорциональной  $\epsilon$  (прямые при каждом фиксированном  $\epsilon$ : дают зависимость  $\bar{Y}_{cp}$  от  $\Omega$ ). Как данные рис. 2, так и рис. 3 были подтверждены экспериментально /6/.

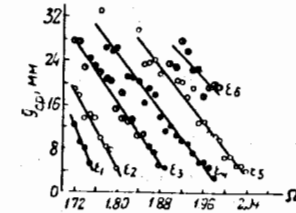


Рис. 3

Расчеты показали также, что траектории части резонансных электронов не могут обойти один из углов прямоугольного резонатора первоначальной конструкции и необходимо существенное снижение его размера вдоль "общего диаметра орбит". Хорошие результаты по ускорению были получены на рассчитанных квадратных резонаторах /6/. Были рассчитаны также резонаторы цилиндрические, предпочтительные по технологическим соображениям, обеспечившие столь же высокую интенсивность пучка на выходе. При этом с целью оптимизации конструкции резонаторов по возможно более широкому набору их характеристик были рассчитаны величины интервала фаз  $\Delta\varphi_0$  вылета электронов с катода (в котором находятся начальные фазы

$\varphi_0$  т.н. резонансных частиц, ускорение которых по условиям фазового движения возможно до 30-й орбиты) в зависимости как от  $N$  и амплитуды ускоряющего СВЧ поля  $\mathcal{E}$ , так и от начальных координат эмиттирующих точек. Рассчитаны и другие характеристики процесса ускорения. В результате были получены количественные данные, позволившие оптимизировать конструкцию резонатора, а также данные, необходимые для правильной установки и выбора диапазона регулирования положения магнитного выводного канала. В соответствии с последними его вход был установлен выше "общего диаметра орбит" и для обеспечения соосности выведенного пучка с электроноводом во всем диапазоне параметров ускорения, а не только при их номинальном наборе, была введена регулировка положения канала вдоль его оси на  $\pm 0,8$  см. (В работе /6/ имеется опечатка - безразмерный зазор между крышками резонатора  $\epsilon$  следует всюду считать равным 1,36 вместо 1,26.)

Для мощного микротрона, в отличие от резонансного линейного ускорителя, нагрузка резонатора пучком может на порядок превосходить т.н. нагрузку холостого хода, характеризуемую мощностью, рассеиваемой в стенках резонатора. Это неблагоприятное соотношение обуславливает при всяком включении ускорителя, хотя и кратковременно - в период тренировки резонатора и повышения его нагрузки до номинала, рассогласование системы, сопровождаемое отражением до 70% мощности обратно в тракт. Теоретическое рассмотрение /7,8/ привело к аналитическим выражениям, связывающим т.н. относительную нагрузку резонатора (отношение мощности пучка к мощности, затрачиваемой на возбуждение резонатора) с коэффициентом стоячей волны напряжения (КСВН) в тракте на всех этапах работы СВЧ системы, от момента включения до выхода на номинальный

режим. Справедливость теории была подтверждена экспериментально и на "холодных" измерениях, и на работающем ускорителе /7-9/.

Большое внимание было уделено формированию достаточно однородного магнитного поля в рабочей области камеры ускорителя /5/. Обработка полюсов обеих четырехполюсных магнитных линз электронно-оптического тракта бустера была проведена в Лаборатории нейтронной физики по специально разработанной технологии, позволившей с точностью в 0,002 см получить гиперболический профиль каждого полюса вплоть до расстояния от оси в 1,6 полуапертуры линзы. Магнитопровод линз рассчитан был на отсутствие насыщения в стали во всем диапазоне применяемых градиентов поля.

Из всех узлов микротрона резонатор во время ускорения находится в наиболее тяжелых условиях, и в подавляющем большинстве случаев длительность очередного периода непрерывной работы бустера определялась ресурсом резонатора. И дело тут не только в том, что практически вся микроволновая мощность так или иначе рассеивается через него (эта средняя мощность невелика,  $\sim 1$  кВт), но, главным образом, в чрезмерной её концентрации как в пространстве (объем резонатора  $\sim 100$  см<sup>3</sup>), так и во времени (вся она выделяется в 50 коротких  $\sim 2$  мкс импульсах). Наиболее разрушительно воздействуют на резонатор балластные электроны, бомбардирующие катодную крышку после первого полуоборота /12/.

Одно из эффективных усовершенствований резонатора состояло в том /11/, что в катодной его крышке была профрезерована канавка, глубина которой в несколько раз превосходила ширину полоски эрозии. Балластные электроны после этого хотя и нагревали дно канавки, но ввиду отсутствия там поля СВЧ почти все нежелательные вторичные процессы подавлялись. На одном из таких резонаторов был зафиксирован максимальный ток ускоренных до последней орбиты электронов 90-100 мА /12/, причем надёжность работы ускорителя и бустера существенно повысилась.

Другое усовершенствование состояло в отказе от перестройки резонатора. Это устранило возникновение больших невосполнимых потерь ускоренных частиц из-за неконтролируемой утраты параллельности катодной крышки и плоскости диска, ограниченного настроечной мембраной, на противоположной крышке резонатора.

В последний период работы импульсного бустера "ИБР-микротрон" все используемые резонаторы были цилиндрическими, не перестраиваемыми и имели канавку для балластных электронов.

Упомянем ещё, что закругление кромок пролётных окон резонатора его электрическую прочность не повышало, а снижало. Существенно её повышали электрополировка и особенно отжиг собранных с катодами резонаторов в вакууме при 670–770 К в течение  $\sim 3$  часов<sup>/5/</sup>.

Нежелательное развитие резонансного СВЧ разряда в полости резонатора при вводе последнего в действие коррелирует, в частности, с наличием барьерного уровня СВЧ мощности, подаваемой на резонатор, составлявшего обычно  $\sim 1\%$  от мощности номинальной. При вводе резонатора в действие этот уровень следует проходить медленно в шающем резонатор режиме, не допуская чрезмерного повышения давления в отрезке волноводного тракта, оканчивавшемся резонатором. Преодолев этот уровень, доведение мощности до номинальной можно выполнять гораздо скорее (за 10–20 минут). В связи с этим, а также ввиду наличия в тракте хотя и кратковременного, но большого отражения СВЧ мощности от резонатора был разработан СВЧ тракт повышенной надёжности<sup>/8/</sup> с двумя последовательно включенными циркуляторами.

Необходимость разработки катода нового типа для микротрона была вызвана, главным образом, чрезмерно большой (в десятки ампер) амплитудой тока нагрева катода в конструкции с прямым омическим его нагревом. Возможность синхронизации вращения маховика ИБР-а с промышленной частотой электросети отсутствовала, в связи с чем возмущение процесса ускорения магнитным полем переменного тока накала катода при традиционном омическом его нагреве было бы неизбежным.

По идее автора, эмиттер катода – цилиндр из  $LaB_6$  – нагревается электронами, эмиттированными накаленной слабым током вольфрамовой нитью, установленной на тех же силовых линиях, что и цилиндр, но в нескольких сантиметрах от медианной плоскости магнита. На нить подается отрицательное напряжение, ускоряющее электроны только в направлении цилиндра. В этой схеме для нагрева катода оказалось достаточным поддерживать мощность бомбардирующих эмиттер электронов  $\sim 20$  Вт при практически полном исключении возмущений магнитного поля микротрона. Вместе с тем и длительность периода надёжной работы катода резко возросла и достигла 500 часов<sup>/5,10/</sup>.

Здесь уместно отметить, что условия работы импульсных бустеров существенно облегчаются, если модуляция реактивности их активных зон будет синхронизована с электросетью. Основываясь на этом

соображении, введена синхронизация модуляции реактивности ИБР-2 с электросетью.

## Глава 2. Основные параметры микротрона-инжектора и первого дубненского импульсного бустера

Факт наличия в микротроне резонансного ускорения электронов с наибольшей чувствительностью регистрируется по внезапному возникновению в зале ускорителя  $\gamma$ -радиации большой интенсивности. Даже ускорение электронов холодной эмиссии с холодного катода уверенно детектируется этим способом.

Измерение же на несколько порядков большего тока ускоренных частиц, эмиттированных накаленным катодом, удобно выполнять перемещаемым вдоль "общего диаметра" орбит коллектором, окруженным для устранения наводок сплошным тонким заземленным вместе со штоком пробника проводящим экраном. Оказалось полезным разделить коллектор на две ламели с плоскостью раздела, совпадающей с медианной плоскостью магнита.

Впервые ускоренные в дубненском микротроне электроны были получены в феврале 1964 г., и после некоторых усовершенствований резонатора в марте того же года их энергия была доведена до 27 МэВ при распределении тока ускоренных частиц по орбитам, изображенном на рис. 4 (кривая 1; на этом рисунке ток на 13 орбите принят за 1). Исследование аксиальной асимметрии пучка, выполненное с помощью двухламельного пробника, подтвердило опасения о чрезмерно возбужденном нежелательном аксиальном движении ускоряемого пучка как целого. Результаты этого исследования помогли выработать руководящую идею создания системы локально действующих корректирующих главным образом аксиальное движение всего пучка токовых витков и применения коррекции положения медианной плоскости магнитного поля на периферии его рабочей области.

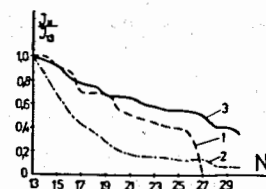


Рис. 4

Однако проектирование и изготовление корректирующей системы требовали нескольких месяцев. Поэтому по предложению Ф. Л. Шапиро<sup>/3/</sup>, имевшего целью ускорение проверки принципа работы

импульсного бустера, мы удлинили волноводный отрезок, на конце которого крепился резонатор микротрона на 8 шагов орбит; и впервые 11-28 декабря 1964 года были проведены эксперименты по умножению нейтронов, генерированных ускоренными в микротроне до 22 МэВ электронами на мишени из  $^{238}\text{U}$ , установленной в центре активной зоны ИБРа.

Параметры микротрона и импульсного бустера для этого короткого этапа работы даны ниже в табл. 3 (1-й столбец).

Отметим существенный недостаток первого варианта конструкции узла мишени, обнаруженный на этом этапе совместной работы микротрона с ИБРом. Исследованная зависимость эффективности конверсии электронов в нейтроны от несоосности мишени и сфокусированного на неё пучка изображена на рис. 5. Несоосность вводилась за счет одновременного перемещения обеих магнитных линз тракта в радиальном (по отношению к пучку) направлении. Как видно из рис. 5, средняя мощность импульсного бустера, которая пропорциональна эффективности конверсии, при несоосности пучка с мишенью всего в 0,25 см снижалась вдвое по сравнению с номиналом.

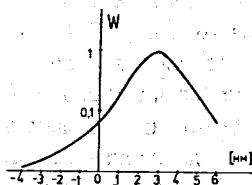


Рис. 5

Вскоре была изготовлена и отлажена система токовых витков и смонтированы системы питания секций обмотки магнита, корректировавших положение средней магнитной плоскости, и витков. Удлиняющая волноводная вставка в блоке резонатора была снята и после сборки ускорителя для работы в номинальном режиме был получен и направлен в реактор пучок электронов с энергией 30 МэВ и другими параметрами, приведёнными во 2-м столбце табл. 3.

Эффективность действия созданных, корректирующих магнитное поле элементов хорошо иллюстрируется рис. 4 (кривая 2-скорректирована средняя магнитная плоскость, 3-коррекция всеми элементами).

Новые данные по эффективности мишени, полученные в результате исследования, выполненного сразу по получении пучка с номинальной энергией, также подтвердили тот факт, что выбранный её диаметр 1 см слишком мал. Коэффициент преобразования электронов в нейтроны оказался равным  $6 \cdot 10^{-3}$ , тогда как ожидаемое его значение для толстой урановой мишени было  $1,6 \cdot 10^{-2} / 5$ . Увеличение диаметра мишени до 1,6 см, реализованное в сентябре 1965 г.

П а р а м е т р	Период работы		
	декабрь 1964 г.	май 1965 г.- июль 1966 г.	март 1967 г.- июль 1968 г.
Энергия электронов (МэВ)	22	30	24-30
Ток в импульсе (мА)	21	60-80	80
Длительность импульса (мкс)	1,6	1,3-2,3	1,6-1,8
Частота следования (Гц)	50	50	50
Импульсная мощность СВЧ, вводимая в резонатор (МВт)		5,7	5,7
Мощность пучка на выходе: импульсная (МВт)		2,4	2,4
средняя (кВт)		0,2	0,2
Эффективность транспортировки пучка на мишень (%)	100	100	100
Диаметр урановой мишени (см)	1	1-1,6	1,6
Коэффициент преобразования электронов в нейтроны		$6 \cdot 10^{-3}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Умножение	100-1000	100-200	100-200
Средняя мощность бустера (кВт)	0,02-0,2	0,6-1,2	0,6-1,2
Полуширина вспышки нейтронов (мкс)	2,5-10	3	3
Пиковый поток в $\angle 4\pi$ (нейтр/с)		$4 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$

В.Т.Руденко, позволило более чем вдвое повысить её эффективность и получить коэффициент  $1,5 \cdot 10^{-2} / 5$ .

В течение обоих первых этапов действия импульсного бустера использовался магнетронный СВЧ генератор. В последний же период, с марта 1967 г., резонатор микротрона возбуждался одним из двух клистронов, предназначенных для электронного инжектора изготавлившегося нового импульсного бустера "ИБР-30 + ЛУЭ-40".

Параметры бустера "ИБР+микротрон" на последнем этапе его работы, закончившейся в июле 1968 г., приведены в 3-м столбце табл. 3.



2-я глава диссертации завершается описанием активации и замеченных изменений свойств применённых в инжекторе материалов под действием электронного пучка и генерируемой им радиации. Отмечено, в частности, что резина кольцевых вакуумных уплотнений обечайки камер в узком секторе в направлении хода пучка над резонатором затвердела и стала хрупкой к концу работы микротрона в Дубне (суммарная экспозиция  $\sim 4000$  часов).

### Глава 3. Инжектор третьего дубненского импульсного бустера

Известно, что на каждый мегаватт мощности пучка протонов, ускоренных до  $\sim 600$  МэВ, выход нейтронов на урановой мишени примерно на два порядка выше, чем при её бомбардировке электронами с энергией 30 МэВ. Кроме того, и выпуск протонного пучка через оконечную стенку вакуумной камеры на мишень осуществляется несравненно легче, чем эквивалентного электронного. Тем не менее, как это показано в 3-й главе диссертации, электронный инжектор для ИБР-2 ЛИУ-30 окажется по меньшей мере в несколько раз экономичнее протонного.

Вместе с тем, как генератор коротких нейтронных импульсов на неразмножающей мишени ЛИУ-30 будет находиться на уровне лучших действующих установок, а осуществление режима работы с сокращением длительности электронного импульса в электромагнитном группирователе, аналогичном упомянутому в <sup>17/</sup>, позволит пиковый поток быстрых нейтронов с мишени в генерируемых вспышках довести до  $\sim 10^{21}$  нейтронов в секунду.

Специфика требований, предъявляемых к инжекторам импульсных бустеров, особенно ярко проявилась в комплексе "ИБР-2 + ЛИУ-30".

Высокий уровень радиации и затрудненность доступа к центру активной зоны ИБР-2 ограничивают как выбор конструкционных материалов для оконечной части электроновода и выпускного окна, так и площадь последнего ( $\sim 16$  см<sup>2</sup>). В то же время мала и частота следования синхронизованных с вращением модулятора реактивности ИБР-2 электронных импульсов, а их энергосодержание (4 кДж на импульс) на один-два порядка выше, чем в известных электронных ускорителях-генераторах нейтронных вспышек на неразмножающих мишенях (в *ORELA* - 0,06 кДж на импульс)\*. В этих условиях

единственным средством против скорого разрушения окна является придание пучку электронов прецизионных электронно-оптических качеств, а именно - ламинарности и равноплотности тока по сечению. Эти качества пока не получены ни в одном ЛИУ.

Решая ключевую проблему создания ламинарного потока (разумеется, в пренебрежении начальным разбросом тепловых поперечных скоростей частиц на эмиттере) в инжекторе ИБР-2 ЛИУ-30 <sup>19,28,30-37/</sup> мы воспользовались тем, что длительность нейтронного импульса бустера с умножением  $\sim 100$  велика - несколько микросекунд. Это позволило и длительность электронного импульса ЛИУ-30 выбрать предельно большую - 500 нс, а ток уменьшить до величины 250 А, при которой есть возможность сформировать ламинарный пучок на входе в ЛИУ-30 и сохранить это его свойство всюду в инжекторе.

Кроме того, последний должен быть защищен от активации и проникновения радиоактивных веществ из зоны ИБР-2 при повреждении выпускного окна, а также обладать высокой надёжностью работы (с мощностью пучка 200 кВт), возможной только при практически полном отсутствии потерь ускоряемых и транспортируемых электронов.

Удовлетворение этих требований привело к ряду особенностей в композиции и составе оборудования, а также в конструкции узлов инжектора. Так, горизонтальная ось ускорительного тракта опущена относительно центра активной зоны реактора на 5 м и перед входом в ИБР-2 пучок электронов заворачивается на угол  $\pi/2$  (рис. 6). В течение каждого промежутка между импульсами автоматизированная электронная система будет выполнять цикл операций контроля соосности вводимого в реактор пучка и вертикального отрезка электроновода, оканчивающегося мишенью, постоянства размеров сечения пучка перед мишенью и однородности распределения плотности тока в нём. Предусмотрены автоматическое отключение ускорителя или переход на частоту следования импульсов 1 Гц при обнаружении чрезмерных отклонений от номинала вышеуказанных параметров пучка. Ввиду того, что при повороте пучка его осевая симметрия утрачивается, а форма его сечения на мишени желательна круглая, на участке ввода фокусировка пучка выполняется четырехполюсными магнитными линзами, а не соленоидами, как это делается на ускорительном тракте.

В случае аварийного нарушения граничной стенки, разделяющей вакуум и охлаждающий мишень натрий, быстродействующий клапан, расположенный перед входом пучка в поворотные магниты, в течение

\* Bowman C.D. IEEE Trans., 1979, NS-26, No. 1, p.1426.

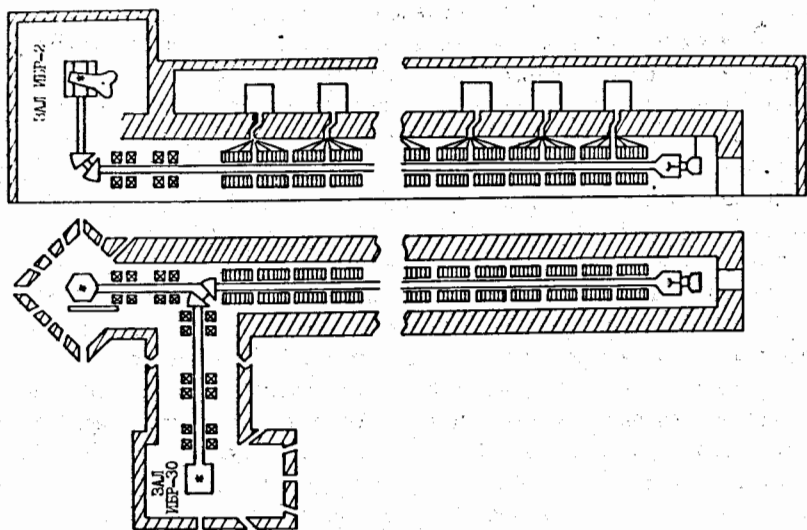


Рис. 6

$5 \cdot 10^{-2}$  с закрывает остальной электроновод и камеру ЛМУ-30 от проникновения в них радиоактивного хладагента.

Следует обратить внимание на казалось бы чрезмерную длину самого ускорителя - 219 м. В [14] было показано, что экономичность ускорителя, в частности, его КПД растёт при увеличении продольного размера и снижении диаметра ускоряющих элементов ЛМУ (т.н. индукторов). Реализация этой идеи в проекте и большая длительность импульса привели к указанной длине ЛМУ-30. Экспериментальная проверка этого решения на головном образце ЛМУ-30 [25] подтвердила его правильность.

Предложенный и реализованный метод количественного предсказания конфигурации эмиттера катода осесимметричной пушки с практически ламинарным и равноплотным пучком релятивистских электронов на сотни ампер тока на её выходе вкратце состоит в следующем. Форма всех электродов, кроме эмиттера катода, и размеры магнитного фокусирующего соленоида фиксируются. Форма же меридианного сечения эмиттера после каждого промежуточного расчета на ЭВМ хода набора (далее-веера) "радиальных траекторий" (действительные

траектории - пространственные кривые), начавшихся на различных радиусах эмиттера, деформируется самой ЭВМ так, чтобы следующий расчетный веер приблизился к эталонному. Контрольное сечение пучка, на котором ЭВМ запоминает перед очередным расчетом веера данные эталонного ламинарного равноплотного пучка, а после расчета сравнивает с ними данные хода траекторий вычисленного веера и вносит необходимые поправки в форму эмиттера, выбирается асимптотически далеко от катода и анодного отверстия. Принципиально важным на всех этапах поиска необходимой формы эмиттера является предположение о ламинарности потока, несмотря на реальное её отсутствие в веерах многих начальных этапов. Оно позволяет всегда пользоваться выведенными в [36] точными для ламинарного потока релятивистскими уравнениями траекторий частиц в осесимметричных пучках, которые в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  имеют вид

$$\begin{cases} z'' + \frac{\sigma}{\delta \beta_z^2} \left[ z' \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{2I}{c^2} (1+z'^2) \beta_z + \frac{\sigma}{\delta} (A_\varphi - \frac{\alpha}{z}) \left( \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} - z' \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} + \frac{\alpha}{z^2} \right) \right] = 0, \\ \varphi' = \frac{\sigma}{\delta \beta_z^2} (A_\varphi - \frac{\alpha}{z}); \end{cases} \quad (I)$$

$$\left( f' \equiv \frac{df}{dz} \right); \sigma = \frac{e}{m_0 c^2}; \beta_z^2 = \frac{\delta^2 (1 - \delta^2 (A_\varphi - \frac{\alpha}{z})^2)}{\delta^2 (1 + z'^2)}; \alpha = (z A_\varphi - \frac{\sigma}{\delta \beta_z^2} z^2 \varphi') \Big|_{z=z_0}; \delta = 1 + \delta V.$$

$V, \bar{A}$  - скалярный и векторный осесимметричные потенциалы суммарных полей пучка и внешних полей,  $e, m_0, c$  - абсолютная величина заряда, масса покоя электрона и скорость света,  $I(z)$  - величина тока пучка в круге радиуса  $z$ .

Расчетная процедура поиска необходимой формы эмиттера, реализованная под руководством и при участии автора Л.А. Меркуловым [28, 30-33, 35], оказалась сходящейся.

Развитый метод предсказания электронно-оптической схемы пушки с ламинарным потоком электронов мы назвали методом внутреннего синтеза.

Длительные расчеты позволили с хорошей точностью предсказать несколько электронно-оптических схем не только пушек-диодов. Методика была распространена также на случай пушек трехэлектродных и была рассчитана форма эмиттера, обеспечивающая ламинарность потока в электронной пушке с сеткой, находящейся под промежуточным потенциалом.

Результаты расчетов должны реализовываться с учетом измене-

ний формы катода при его нагреве от комнатной температуры, при которой происходит его изготовление, до рабочей температуры ~1120 К. При реализации необходимо соблюдение и ряда других предполагавшихся при расчете условий - однородности эмиссионной способности эмиттера, отсутствия возмущений магнитного и электрического поля и т.п.

Решение точного для ламинарного потока уравнения (1), согласованное с результатами интегрирования уравнения Пуассона для области всего протяженного ускорительного тракта ЛМУ-30, нельзя выполнить даже на современных ЭВМ. Однако для инжектированного в ЛМУ осесимметричного ламинарного релятивистского пучка электронов на сотни ампер тока найдено достаточно точное самосогласованное аналитическое выражение потенциала  $V(z, z) / 37$ , которое можно записать в виде

$$V(z, z) = V_A + V_y(z, z) + \frac{I(z)}{c\beta_u} - \frac{I_n}{c\beta_u} (1 + 2 \ln \frac{R_c}{R}). \quad (2)$$

Здесь  $V_A = \text{const}$  - амплитуда напряжения на катоде электронной пушки,  $eV_y$  - полный прирост энергии электрона в вихревом ускоряющем поле,  $I_n$  - величина тока пучка,  $R(z)$ ,  $R_c(z)$  - радиус наружной траектории и радиус покрытой резистивным слоем стенки вакуумной камеры. Вариации последних вдоль  $z$  предполагаются плавными. Разумеется, вдоль траектории  $I(z) = \text{const}$ .

$$\beta_a \approx \beta_A \left[ 1 - \frac{\sigma I_n}{c(\gamma_A^2 - 1)^{3/2}} (1 + 2 \ln \frac{R_c}{R}) \right], \quad \beta_A = (1 - \frac{1}{\gamma_A^2})^{1/2}, \quad \gamma_A = 1 + \sigma(V_A + V_y). \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) вытекает непараксиальное уравнение траекторий, допускающее интегрирование на ЭВМ при скромных затратах счетного времени:

$$z'' = \frac{1}{\gamma \beta_u^2} \left\{ -\frac{\sigma^2}{\gamma} \left( \frac{H}{2} z - \frac{\alpha}{2} \frac{H''}{16} z^3 \right) \left( \frac{H}{2} + \frac{\alpha}{z^2} - \frac{3H''}{16} z^2 - \frac{H'}{2} z z' \right) - \right. \\ \left. - \gamma' z' + \frac{2\sigma I_n}{c\beta_u} \left[ (1 - \beta_a^2) \frac{I}{I_n} - z'^2 \left( 1 + \frac{I}{I_n} \beta_a^2 \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

$$[ H = H(0, z) ].$$

Диамagnetизмом пучка, малыми для ЛМУ-30 величинами  $\frac{\partial V_y}{\partial z}$  и слагаемыми в  $\frac{\partial V}{\partial z}$ , имеющими множитель  $\beta_c'$ , пренебрежено.

Интегрирование (4) на ЭВМ при близких к реальным распределениям  $H(0, z)$  и  $\gamma'$  на всей длине ускорительного тракта ЛМУ-30 вдоль каждой из 5 траекторий, начавшихся на различных радиусах  $z_0$ , имеющих начальные производные  $z_0'$ , показало, что ламинарность инжектированного потока сохраняется на всем тракте лишь тогда, когда проекция начального фазового объема пучка на плоскость  $(z_c, z_0')$  близка к произвольно направленному прямому лучу, исходящему из начала координат.

В процессе последних расчетов было найдено, что параксиальное приближение по крайней мере для инжекторного участка ЛМУ-30 является слишком грубым. Вследствие этого рассчитанные с его помощью допуски на электронно-оптические параметры ЛМУ-30 /19, 20/ были скорректированы по (4). Результаты представлены в табл. 4. В ней даны полные ширины допустимых относительных изменений, одинаковых на всем тракте, отдельных поименованных в первой колонке параметров при фиксированных номинальных значениях всех остальных.

Таблица 4

Параметр	Расчет по (4)	Параксиальное приближение
$\frac{\Delta H}{H} (\%)$	6	10-15
$\frac{\Delta \gamma_0}{\gamma_0} (\%)$	11	20
$\frac{\Delta \gamma'}{\gamma'} (\%)$	22	22
$\frac{\Delta I_n}{I_n} (\%)$	50	56
$\frac{\Delta R_c}{R_c} (\%)$	23	10-14
$\Delta R_c' (\text{радиан})$	0,05	0,05

Экспериментальная проверка эффективности предсказания электронно-оптических схем осесимметричных пушек с ламинарным потоком электронов на выходе методом внутреннего синтеза была проведена на созданной в ЛФФ ОИЯИ в соответствии с вышеупомянутыми расчетами экспериментальной электронной пушке ЭЭП-2, исследования кото-

рой /34/ подтвердили правильность теории и метода расчета. Поток электронов на выходе ЭЭП-2, в 36 см от катода, близок к ламинарному даже при наборе параметров, существенно отличающихся от номинальных. Диаметр пучка здесь, многократно измеренный при токах пучка от 130 до 250 А, удовлетворительно согласуется с расчетными его значениями. Изменение тока питания фокусирующего соленоида вызывает согласующееся с расчетом однозначное изменение диаметра пучка. Последний при энергии электронов до 320 кэВ и скромной величине максимальной напряженности поля фокусирующего соленоида  $H_{max}$  до 450 Э можно уменьшить (в 36 см от катода) до ~1 см и менее. Минимально возможный диаметр измерен не был из-за ожидавшегося разрушения токоприёмника-коллиматора. Пропущенная сквозь его отверстие диаметром 0,26 см струйка электронов анализировалась перемещаемым поперек неё коллектором, установленным в 5,7 см от коллиматора. Результаты анализа свидетельствуют о практическом отсутствии угловой расходимости в струйке. Эмиттанс всего пучка с током 254 А, энергией электронов 323 кэВ и  $H_{max} \sim 400$  Э не превосходил  $2 \cdot 10^{-2}$  см·радиан. Ламинарность потока электронов в ЭЭП-2 подтверждается также и четко прослеживаемым подобием хода радиального распределения плотности тока по диаметру пучка при фиксированных  $I_n$ ,  $V_A$  и варьировании задаваемого для каждого распределения  $H_{max}$ .

#### Основные результаты диссертации

Достигнута ЦЕЛЬ РАБОТЫ, состоявшая в повышении с помощью электронного ускорителя-инжектора качества нейтронного источника базовой установки экспериментальной ядерной физики - импульсного реактора на быстрых нейтронах. Созданный инжектор импульсного бустера "ИБР+микротрон" повысил указанный параметр ИБРа в 60 раз. Заложены основы для его увеличения в ИБР-2 в 140 раз с помощью разработанного инжектора ЛИУ-30. В этом же состоит и АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Впервые в мире создан электронный инжектор импульсного реактора и в части, касающейся инжектора, продемонстрирована успешная работа на эксперимент мощного нейтронного источника нового типа - импульсного бустера "ИБР+микротрон". Положено начало и показана перспективность развития нового направления в ускорительной технике - создания ускорителей-инжекторов для импульсных реакторов.

Развиты и проверены экспериментально теория дрейфа орбит в микротроне под действием магнитного СВЧ поля резонатора, а также теория согласования последнего с волноводным трактом. Разработаны и созданы эффективные волноводный СВЧ тракт, резонатор, катод, система коррекции орбит, система вывода и электронно-оптический тракт, транспортировавший пучок от микротрона до урановой мишени, установленной в центре активной зоны ИБРа. Полученные параметры бомбардировавшей мишень пучка - ток электронов 80 мА при их энергии 30 МэВ - не превзойдены в микротронах до сих пор.

Предложен тип и физически обоснованы параметры и основные конструктивные особенности инжектора 3-го дубненского импульсного бустера - ЛИУ-30 на энергию электронов 30 МэВ и среднюю мощность пучка 200 кВт.

Предложена идея, разработана теория, разработан, реализован и проверен экспериментально метод расчета формы эмиттера осесимметричных электронных пушек с ламинарным пучком на сотни ампер (метод внутреннего синтеза). Дано непараксиальное уравнение траекторий в ускоряемом в ЛИУ осесимметричном ламинарном пучке электронов на сотни ампер тока, на основе которого найдены условия, необходимые для сохранения ламинарности потока на всем ускорительном тракте.

По теме диссертации получено 8 авторских свидетельств на изобретения, из которых 2 внедрено.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Создан инжектор ИБРа - микротрон, который эффективно в течение 3300 часов работал в составе импульсного бустера "ИБР+микротрон" на эксперимент с высоким энергетическим разрешением. Электронно-оптический тракт микротрона безотказно действует в течение 16 лет. Сейчас он работает в составе 2-го дубненского бустера "ИБР-30 + ЛУЭ-40", а микротрон, перевезенный в г. Ужгород, является действующей базовой установкой Отдела фотоядерных процессов ИЯИ АН УССР\*. Аналогичный микротрон создан по документации ЛНФ ОИЯИ при консультации автора и действует в ФЭИ, г. Обнинск\*\*.

\* Завершен проект и идёт создание инжектора ЛИУ-30 для мощного импульсного реактора ИБР-2. Разработана электронная пушка-диод с ламинарным потоком на энергию 300 кэВ и ток 250 А для ЛИУ-30.

Выполненные разработки и проверенные экспериментально теория и методы расчета могут найти применение при создании новых

\* Ониско А.Д., Попович К.Д. Препринт КИЯИ-75-29, Киев, 1975.

\*\* Абрамов А.И. и др. Препринт ФЭИ-211, Обнинск, 1970.

ускорителей, а метод внутреннего синтеза - в расчете сильноточных осесимметричных электронных пучков с ламинарным пучком также и для других установок и приборов.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ, содержание и названия глав одинаковы в ней и в автореферате; лишь "Заключение диссертации" в автореферате имеет заголовок "Основные результаты диссертации". Общий объем работы - 150 стр.

Основные результаты ОПУБЛИКОВАНЫ в 38 работах. Они докладывались на 3-й Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях (Женева, 1964 г.), на 5-й конференции по физике и технике исследовательских реакторов (Варшава, 1968 г.), на симпозиуме по импульсным реакторам (Альбукерк, США, 1969 г.), на Всесоюзных совещаниях по ускорителям (Москва, 1974 г., Томск, 1975 г.).

#### Литература

1. Б.Н.Бунин, С.К.Николаев, И.М.Матора и др. Опыт эксплуатации реактора ИБР, его применение для нейтронных исследований и его характеристики при инъекции нейтронов от микроотрона. 3-я Международная конференция ООН по использованию атомной энергии в мирных целях. Доклад 28/P/324, 1964, 20 с.
2. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, С.П.Капица, И.М.Матора и др. Микроотрон-инжектор на 30 МэВ для ИБРа. ОИЯИ, Р-2313, Дубна, 1965, 10 с.
3. В.Д.Ананьев, И.М.Матора и др. Импульсный реактор ЛНФ ОИЯИ и перспективы применения импульсных реакторов в нейтронной спектроскопии. ОИЯИ, 2372, Дубна, 1965, 27 с.; Kernenergie, 9. Jahrgang, 1966, n.12, 365-373.
4. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, И.М.Матора и др. Микроотрон-инжектор на 30 МэВ для ИБРа. АЭ., 1966, 20, 106-III; J. Nucl. Energy, 1966, p. C., v. 8, № 6.
5. В.Д.Ананьев, П.С.Анцупов, И.М.Матора и др. Микроотрон Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. ОИЯИ, 9-3283, Дубна, 1967, 40 с.
6. И.М.Матора и др. Расчет ускорения электронов до 30 МэВ прямоугонными резонаторами в микроотроне. ОИЯИ, Р-2706, Дубна, 1967, 31 с.; ЖТФ, 1967, т. 37, с. 1660-1670.

7. И.М.Матора, Р.В.Харьков. О согласовании резонатора микроотрона с волноводным трактом. ОИЯИ, Р9-3567, Дубна, 1967; ЖТФ, 1969, т. 39, с. 1969-1976.
8. И.М.Матора, Р.В.Харьков. Волноводный СВЧ тракт микроотрона на 30 МэВ. ПТЭ, 1967, № 3, с. 28-32.
9. И.М.Матора, Р.В.Харьков, А.Н.Гринберг. О согласовании в волноводном тракте, нагруженном на ускоряющий объемный резонатор сильноточного микроотрона. ОИЯИ, 9-3376, Дубна, 1967, 10 с.
10. В.Д.Ананьев, В.С.Киндышева, И.М.Матора. Катод сильноточного микроотрона на 30 МэВ. Порошковая металлургия, 1968, т. 8, с. 48-51.
11. И.М.Матора, Р.В.Харьков. А.с. № 230323 (СССР). Резонатор микроотрона. ОИПОТЗ, 1969, № 15, с. 179.
12. И.М.Матора, Р.В.Харьков. К вопросу об электрической прочности ускоряющего резонатора сильноточного микроотрона. ОИЯИ, Р9-4206, Дубна, 1968, II с.
13. В.Д.Ананьев, И.М.Матора. К определению потерь энергии релятивистскими электронами в толстых мишенях из свинца и вольфрама. ОИЯИ, Р9-4913, Дубна, 1970, 10 с.
14. И.М.Матора. К теории линейного индукционного ускорителя. ОИЯИ, Р9-3184, Дубна, 1967, 12 с.; ЖТФ, 1969, т.39, с.190-196.
15. В.Д.Ананьев и др. Импульсный реактор с инжектором ИБР-2. 5-я конференция по физике и технике исследовательских реакторов, Варшава, декабрь 1968 г. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969, 37 с.
16. В.Д.Ананьев и др. Опыт эксплуатации и развитие импульсных периодических реакторов в Дубне. Симпозиум по импульсным реакторам, Альбукерк, США, 28-30 янв., 1969 г. ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969, 35 с. В сб.: Fast Burst Reactors. USA EC CONF-690102, 1969, p.173.
17. Ю.А.Александров, И.М.Матора. О возможности экспериментального исследования непосредственных  $n-e$  соударений. ОИЯИ, Р3-7634, Дубна, 1973, 6 с.
18. П.С.Анцупов, И.М.Матора, Л.А.Меркулов. Исследование экранирования магнитного поля Земли пермалловыми сердечниками индукторов ЛИУ. ОИЯИ, Р9-4498, Дубна, 1969, 10 с.
19. И.М.Матора и др. О формировании пучка электронов в ЛИУ. ОИЯИ, Р9-5268, Дубна, 1970, 12 с.; ЖТФ, 1971, т. 41, с. 1469-1471.

20. Вахрушин Ю.П., Иванова Н.И., Комаров О.Л., Кузнецов В.С., Матора И.М. и др. Некоторые вопросы выбора и расчета фокусирующей системы ЛПУ на 30 МэВ. ОИЯИ, Р9-5714, Дубна, 1971, 9 с.
21. Анацкий А.И., Алексеев Р.А., Ананьев В.Д., Анцупов П.С., Белов В.П., Букаев П.В., Богданов О.С., Вахрушин Ю.П., Гаген-Торн В.К., Глухих В.А., Колесов Н.И., Комар Е.Г., Комаров О.Л., Кузнецов В.С., Малышев И.Ф., Матора И.М. и др. Проект сильноточного линейного индукционного электронного ускорителя на 30 МэВ - инжектора импульсного реактора ИБР-2. Доклад на конференции по ускорителям (Чикаго, США, 1 - 3 марта 1971 г.); IEEE Trans., NS -18, 1971, p.625-627.
22. Анацкий А.И., Бурцева Н.А., Вахрушин Ю.П., Мартынова К.Д., Матора И.М. Магнитные свойства пермаллоя 50-НП электроплучевой плавки при импульсном перемагничивании. ОИЯИ, Р9-6075, Дубна, 1971, 11 с.
23. Вахрушин Ю.П., Матора И.М. ЛПУ-новне генераторы мощных пучков релятивистских электронов. УФН, 1973, т. 110, в. 1, с. 117-137.
24. Анцупов П.С., Матора И.М. А.с. № 457109 (СССР). Импульсный трансформатор. Бюл. ОИЯИ, 1975, № 2, с. 101.
25. Анцупов П.С., Богданов О.С., Вахрушин Ю.П., Волжев А.А., Гаген-Торн В.К., Житенев В.Г., Казанкин Ю.А., Колесов Н.И., Комаров О.Л., Кузнецов В.С., Матора И.М. и др. Исследования ЛПУ-0,75/250 - головного образца электронного инжектора ИБР-2. НИИ ЭФЛ, А-0213, Л., 1974. 43 с. Доклад на 4-м Всес. совещании по ускорителям, ноябрь, 1974.
26. Матора И.М., Саввин В.А. Теория формирования импульса неоднородной формирующей линией на произвольной нагрузке. ОИЯИ, 9-9006, Дубна, 1975. 14 с.; Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 9, с. 1878-1886.
27. Матора И.М., Саввин В.А. Расчет импульсов, сформированных неоднородной линией на произвольной нагрузке. ОИЯИ, Р9-9121, Дубна, 1975. 11 с.
28. Матора И.М., Меркулов Л.А. Расчет экспериментальной электронной пушки ЭЭП-2. Сб.: Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Материалы Всес. конф. Томск, 3-5 сент. 1975. Изд. ТГУ, г. Томск, 1975, с.138.
29. Анцупов П.С., Матора И.М., Швец В.А. Импульсный трансформатор экспериментальной электронной пушки. ОИЯИ, Р13-9276, Дубна, 1975. 8 с.; ПТЭ, 1976, № 4, с.137-138.
30. Матора И.М., Меркулов Л.А. Формирование ламинарного потока в сильноточной электронной пушке. Радиотехника и электроника, 1977, т.22, №6, с.1246-1252.
31. Матора И.М., Меркулов Л.А. Поведение ламинарного пучка в мощной электронной пушке при изменении ее параметров. ОИЯИ, Р9-9818, Дубна, 1976. 12 с.
32. Матора И.М., Меркулов Л.А. Осесимметричная пушка на энергию электронов 300 кэВ и ток 250 А с ламинарным потоком. ОИЯИ, Р9-10670, Дубна, 1977. 3 с.
33. Матора И.М., Меркулов Л.А. Влияние распределения плотности эмиссии катода на характер потока в сильноточной электронной пушке. ОИЯИ, Р9-10795, Дубна, 1977. 10 с.
34. Анцупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Быков В.Н., Журавлев В.В., Заббаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М. и др. Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2. ОИЯИ, Р9-10999, Дубна, 1977. 14 с.; Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 12, с.2605-2611.
35. Матора И.М., Меркулов Л.А. Формирование ламинарного потока в трехэлектродной сильноточной осесимметричной электронной пушке. ОИЯИ, Р9-10504, Дубна, 1977. 10 с.
36. Матора И.М. Точное релятивистское уравнение траекторий электронов в мощных осесимметричных ламинарных пучках. ОИЯИ, Р9-11407, Дубна, 1978. 6 с.
37. Матора И.М., Стрелина О.А. О сохранении свойства ламинарности потока электронов в ЛПУ. ОИЯИ, Р9-12673, Дубна, 1979. 8 с.
38. Матора И.М.. О фазирующем действии ускоряющего электрического поля в циклотроне. МТФ, 1962, т. 32, в. 8, с. 914-918.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 июня 1980 года.