

# КОМПАКТНЫЙ ИНЖЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ 10 см-ДИАПАЗОНА

*Н.И. Айзацкий, П.Г. Гуртовенко, В.Ф. Жигло, Е.Ю. Крамаренко, В.М. Кодяков, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, А.Н. Опанасенко, С.А. Пережогин, И. Пономаренко, В.В. Селезнев, Д.Л. Степин, И.В. Ходак*

*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина  
E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты расчета динамики электронов, описание конструкции и результаты испытаний инжектора, созданного на основе резонаторной структуры с экспоненциально нарастающей вдоль оси амплитудой электрического поля. Для обеспечения аксиальной симметрии ускоряющего поля связь резонаторной структуры с подводным волноводом осуществляется через коаксиально-волноводный переход. Инжектор рассчитан на выходной ток до 1 А при энергии ускоренных частиц до 1 МэВ.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Характеристики пучка на выходе линейного резонансного ускорителя электронов формируются, в основном, в инжекторе – устройстве, в котором происходит образование сгустков частиц, размеры которых малы по сравнению с рабочей длиной волны ускорителя. Применение в инжекторе сравнительно низковольтных (несколько десятков килоэлектронвольт) электронных пушек позволяет уменьшить габариты инжектора и высоковольтного оборудования модулятора пушки, повысить надежность работы ускорителя. Группирующая система на не распространяющихся колебаниях (см. например, [1]) позволяет эффективно формировать сгустки частиц из непрерывного пучка, эмитированного с катода таких низковольтных пушек, и ускорять частицы до релятивистских скоростей. В резонансной системе такого группирователя поле на оси экспоненциально нарастает от места инъекции электронов до их выхода из системы благодаря специальному выбору размеров резонаторов. Инжектор, описанный в [2,3], является усовершенствованным устройством такого типа, отличающимся от прототипа оптимизированной резонансной структурой, состоящей из пяти резонаторов и коаксиальным вводом СВЧ-мощности. Инжектор может работать с двумя диодными электронными пушками: 25 кВ, 250 мА или 25 кВ, 1.1 А. Инжектор был изготовлен и протестирован на испытательном стенде. В данной работе приведены расчетные параметры пучка, описание конструкции и результаты испытаний инжектора.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА

Для расчета характеристик резонансной и магнитной систем инжектора применялся пакет POISSON/SUPERFISH [4]. Моделирование динамики частиц в диодной пушке и резонансной системе выполнялось с использованием программы EGUN [5] и PARMELA [6]. Для повышения эффективности формирования сгустков электронов проведена оптимизация распределения поля на оси резонансной системы по методике [2]. Оптимизация проводилась для тока электронной пушки 250 мА без наложения

магнитного поля соленоида. Характеристики пучка на выходе инжектора с окончательной конфигурацией поля, вычисленные с помощью [7], для установленного режима при использовании различных пушек, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение	
Ток пушки, А	0,25	1,1
Ток пучка, А	0,23	0,89
Частота следования сгустков, МГц	2797,15	2797,15
Мощность СВЧ-питания, МВт	1	1,5
Нормализованный эмиттанс, $\epsilon_{rms\ x,y}, \mu \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}, (1 \sigma)$	9	35
Размер пучка ( $4\sigma_{x,y}$ ), мм	2,5	9,2
Фазовая протяженность сгустка (для 70% частиц), °	7,7	14,7
Ширина энергетического спектра, (для 70% частиц), %	3,9	4,4
Энергия в максимуме энергетического спектра, кэВ	980	970

Как видно из таблицы, инжектор обеспечивает достаточно малую фазовую ширину сгустков при формировании пучка амперного диапазона. Высокая энергия частиц позволяет производить их непосредственную инъекцию в ускоряющую секцию с фазовой скоростью волны, равной скорости света.

## 3. КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Конструктивно инжектор состоит из следующих узлов: диодной электронной пушки, группирующей системы, коаксиального ввода мощности, коаксиально-волноводного перехода, короткого соленоида, датчика тока и аксиально-симметричной магнитной линзы.

В обеих пушках используется импрегнированный оксидный катод. В пушке на ток 250 мА – сферический, диаметром 5 мм, а в пушке на ток 1,1 А – плоский, диаметром 14 мм.

Группирователь изготовлен из безкислородной меди по технологии «диск-кольцо», то есть каждый резонатор состоит из цилиндрического кольца и двух дисков, в которых выполнены отверстия для

пролета пучка. Внутренние поверхности резонаторов обработаны алмазным резцом. Кольца и диски соединены между собой с помощью пайки твердым припоем в вакуумной печи. На периферии резонаторов выполнено 16 каналов для протока теплоносителя. В первом резонаторе установлен калиброванный индуктивный зонд для контроля амплитуды поля.

Для уменьшения времени установления колебаний в инжекторе и для обеспечения эффективного ускорения пучка с током до 1 А коэффициент связи резонансной системы с волноводом выбран около 5. В прототипе этого инжектора использовалась связь через отверстие в боковой поверхности резонатора с наибольшим полем (пятый резонатор). При таком большом коэффициенте связи в этом резонаторе возможно нарушение аксиальной симметрии поля [8]. Из-за достаточно большой напряженности поля на оси пятого резонатора частицы пучка получают поперечный импульс, который приводит к сдвигу центра пучка. Коррекция положения пучка магнитными элементами из-за энергетического разброса частиц приводит к ухудшению поперечного эмиттанта. Одним из методов борьбы с этим явлением является применение коаксиального ввода СВЧ-мощности в систему [9,10].

Еще одним аргументом в пользу применения коаксиального ввода СВЧ-мощности является тот факт, что в этом случае, благодаря аксиальной симметрии системы, она может быть полностью рассчитана, включая коэффициент связи с подводящей линией, с помощью пакета POISSON/SUPERFISH. Это существенно упрощает процесс настройки группирователя.

СВЧ-мощность к коаксиальной линии подается через коаксиально-волноводный переход (КВП) «пуговичного» типа (схематично показан на Рис.1 справа).

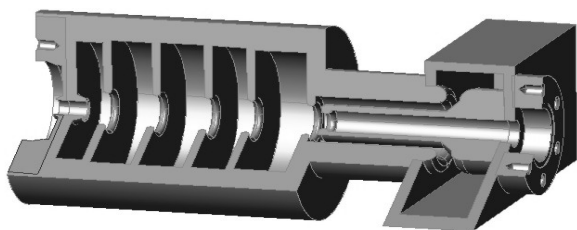


Рис.1. Схематичное изображение группирователя, коаксиального ввода мощности и КВП

Для подавления распространения высших типов волн в коаксиальной линии их критические частоты должны быть намного выше рабочей частоты ускорителя [9]. Размеры внутреннего проводника коаксиальной линии должны обеспечить электрическую прочность при величине мощности более 1 МВт и отсутствие потерь частиц в канале для транспортировки пучка. Волновое сопротивление линии было выбрано 22,5 Ом при диаметре центрального проводника 22 мм (при сопротивлении 50 Ом рабочая частота ускорителя лежала бы в полосе распространения первой высшей моды такой коаксиальной линии). Длина коаксиала составляет 75 мм, что обеспе-

чивает ослабление высших мод на величину, не менее 30 дБ.

КВП осуществлен на базе волновода 72x34 мм. Для согласования перехода на этапе предварительных испытаний предусмотрен подвижный короткозамкнутый поршень.

Применение коаксиального ввода СВЧ-мощности позволило разместить на группирователе короткий соленоид, который вместе с аксиально-симметричной магнитной линзой улучшил транспортировку пучка. Для уменьшения влияния полей рассеяния соленоида в месте расположения катода пушки на динамику электронов, соленоид выполнен в виде двух секций. Одна секция, содержащая 1150 витков, создает основное поле, а вторая, содержащая 100 витков, включенная встречно к первой уменьшает поле вблизи катода. Обе секции помещены в общий магнитопровод.

Все узлы инжектора смонтированы на одном основании, что облегчает его монтаж на ускорителе. Вид инжектора в сборе показан на Рис.2.

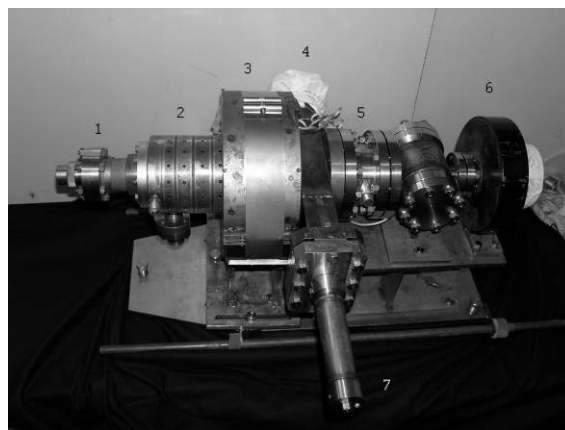


Рис.2. Инжектор в сборе. Цифрами обозначены: 1 – катодный узел электронной пушки; 2 – группирователь; 3 – соленоид; 4 – подводящий волновод; 5 – датчик тока пучка; 6 – магнитная линза; 7 – механизм перемещения короткозамкнутого поршня

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

### 4.1. НАСТРОЙКА И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При изготовлении инжектора, прежде всего, был изготовлен и настроен КВП. Для этого с помощью пакета POISSON/SUPERFISH был рассчитан трансформатор для перехода от коаксиальной линии 32x22 мм на коаксиальную линию 16x7 мм, которая нагружалась на стандартную согласованную нагрузку с  $K_{СВ} < 1,05$ . КВП настраивался путем изменения высоты «пуговицы» и подстройкой положения поршня. Частотная зависимость КСВ при положении поршня, при котором наблюдалось минимальное значение КСВ, показана на Рис.3.

На рабочей частоте ускорителя (2797,2 МГц) часть мощности, передающаяся из прямоугольного волновода в коаксиальную линию, зависит от положения поршня относительно оси коаксиальной ли-

нии (см. Рис.4). Через КВП может быть передано до 99,5% падающей мощности.

Настройка группирователя базировалась на расчетах с использованием пакета POISSON/SUPERFISH. Прежде всего, были определены фактические коэффициенты связи через отверстия на оси дисков. Коэффициенты связи определялись из результатов измерения резонансных частот двухрезонаторных макетов. Расчетные радиусы отверстий в дисках были скорректированы таким образом, чтобы параметры экспериментальных и расчетных макетов совпадали. Далее, были определены радиусы всех резонаторов (колец) резонансной системы, обеспечивающей необходимое распределение поля на рабочей частоте ускорителя. Исходя из полученных радиусов, были вычислены собственные частоты цилиндрических резонаторов, образованных из соответствующих колец, с учетом поправок на образование менисков при пайке, вакуумирование, изменения температуры от комнатной, при которой происходит настройка резонаторной системы, до рабочей температуры. При изготовлении группирователя каждое кольцо растачивалось до тех пор, пока частота макета, состоящего из кольца и двух плоских боковых крышек, не сравняется с соответствующей расчетной величиной.

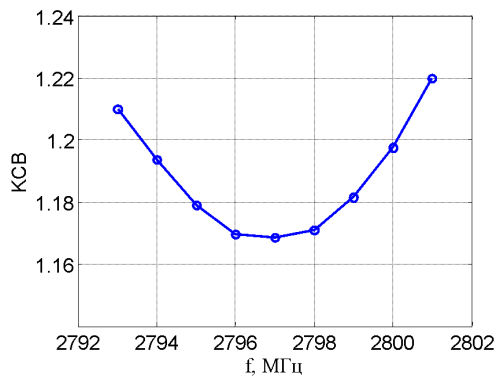


Рис.3. Частотная зависимость КСВ настроенного КВП

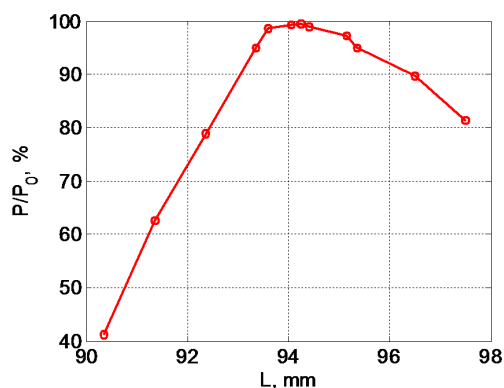


Рис.4. Зависимость коэффициента передачи мощности от положения поршня

После настройки колец, группирователь был спаян в вакуумной печи. Измеренные после пайки резонансные частоты продольных мод в нижней полосе пропускания совпали с расчетом в пределах 100 кГц.

Распределение поля на оси группирователя определялось методом малого резонансного возмущения с использованием методики [11], которая позволяла отслеживать изменения резонансной частоты с относительной среднеквадратичной погрешностью  $2 \cdot 10^{-7}$  при добротности измеряемого резонатора 10000. Для определения резонансной частоты был использован сигнал отраженной волны, так как малая амплитуда сигнала с индуктивного зонда в первом резонаторе (ослабление 75 дБ) не позволяла использовать схему четырехполюсника. В качестве возмущающего тела мы использовали керамическую трубку длиной 6 мм и диаметром 1,8 мм. Формфактор тела составлял  $2 \cdot 10^{-19}$ . Как видно из Рис.5, измеренное распределение поля на рабочей моде (кривая, обозначенная кружочками) хорошо совпадает с расчетом (сплошная кривая).

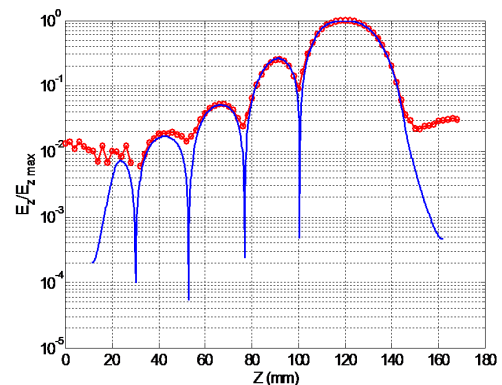


Рис.5. Распределение поля на оси группирователя для рабочей моды

Следует заметить, что распределение поля на оси структуры хорошо совпадает с расчетом и на не рабочих модах (см., как пример, Рис.6).

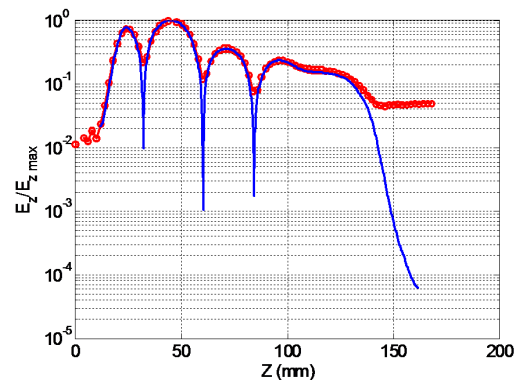


Рис.6. Распределение поля на оси группирователя для моды, ближайшей по частоте к рабочей

Перед установкой на испытательный стенд были измерены частотные зависимости КСВ в подводящем волноводе инжектора при различных положениях короткозамыкающего поршня (см. Рис.7). Исследования частотной зависимости фазы КСВ показали, что резонансная система инжектора пересвязана с подводящим волноводом, поэтому коэффициент связи численно равен КСВ. Как видно из рисунка, поршень позволяет изменять коэффициент связи в широких пределах без существенного изменения резонансной частоты системы. Из частотной зависи-

мости КСВ была определена также собственная добротность резонансной системы. Расчетные и измеренные электродинамические параметры резонансной системы инжектора приведены в таблице 2.

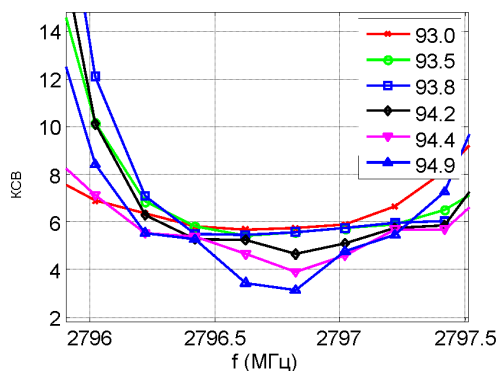


Рис. 7. Зависимость КСВ от частоты при различных положениях короткозамыкающего поршня (числа у кривых – расстояние поршня от оси системы в мм)

Таблица 2

Рабочая частота, МГц	2797,15
Рабочая температура, °С	37
Собственная добротность	10500
Коэффициент связи с волноводом	3,3 - 6
Мощность СВЧ-питания, МВт	≤ 1,5
Отношение максимальной напряженности поля на оси к максимальной напряженности поля на оси первого резонатора (расчет)	140
Максимальное поле на оси (расчет), МВ/м	38
Максимальное поле на поверхности (расчет), МВ/м	60

## 4.2. ИСПЫТАНИЯ НА БОЛЬШОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ

После измерения электродинамических характеристик резонансной системы, инжектор был установлен на испытательный стенд. Системы стенда обеспечивают работоспособность инжектора и измерение параметров пучка. Мощность СВЧ-питания может плавно изменяться с помощью регулируемого направленного ответвителя от 100 до 1500 кВт при длительности импульсов до 2 мкс. Частота повторения импульсов может выбираться в диапазоне 1...50 Гц. Частота источника СВЧ-питания (автогенератор на клистроне КИУ-12АМ) измерялась методом «нулевых биений» с помощью частотомера ЧЗ-66. Температура резонансной системы инжектора может поддерживаться постоянной в пределах от 30 до 50°С. Магнитоэрозийные насосы обеспечивают в вакуумной системе инжектора давление до  $5 \cdot 10^{-7}$  Торр. Модулятор пушки позволяет плавно изменять напряжение накала от 0 до 8 В и амплитуду импульса высокого напряжения в пределах 0...30 кВ при длительности импульса 3 мкс. Энергетические характеристики пучка измеряются с помощью 90° дипольного магнита, щелевого коллиматора и ци-

линдра Фарадея. Пространственные поперечные характеристики пучка определяются с помощью двух щелевых коллиматоров, перемещающихся во взаимно перпендикулярных плоскостях и цилиндра Фарадея.

После получения высокого вакуума была произведена СВЧ-тренировка резонансной системы. Подъем мощности от 100 до 1500 кВт занял около 6 часов при частоте повторения импульсов 1 Гц без значительного количества пробоев.

Следует заметить, что при тренировке резонансной системы не наблюдалось развитие мультипакторного разряда, как это было при испытаниях инжектора-прототипа [12]. Вместе с тем, после активировки катода пушки и подачи высокого напряжения при включенном соленоиде сигнал с измерительной петли возрастал в несколько раз, а при некоторых значениях тока соленоида на вершине наблюдались высокочастотные колебания (см. Рис.8).

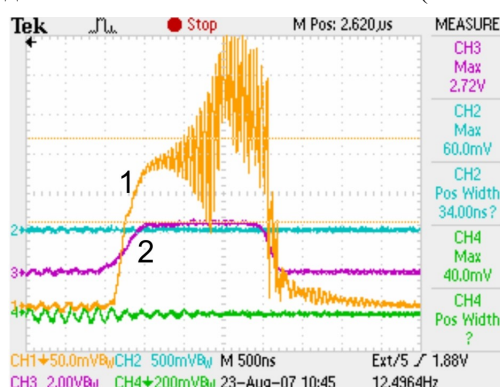


Рис. 8. Осциллограммы. 1 – амплитуда поля в резонаторе, 2 – амплитуда падающей волны

Это явление сопровождалось некоторым ухудшением вакуума, и прекращалось примерно после получаса работы с частотой повторения импульсов 12 Гц. Одной из причин возникновения данного явления, по-видимому, может быть оседание на стенках резонатора веществ, испаряющихся с катода и инициирование вторично-эмиссионного разряда за счет увеличения коэффициента вторичной эмиссии. Тот факт, что появление неустойчивости зависит от продолжительности работы инжектора с СВЧ-мощностью, свидетельствует о том, что наблюдаемое явление в значительной мере определяется состоянием поверхности резонансной системы.

Типичные осциллограммы, характеризующие работу инжектора с пучком при отсутствии вышеупомянутого явления, представлены на Рис.9.

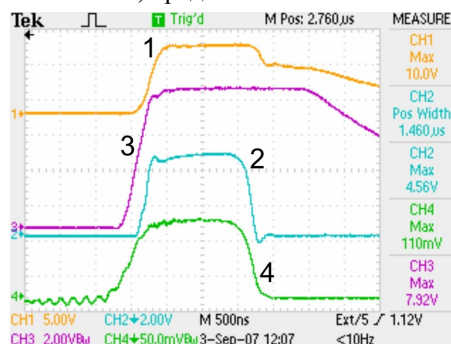


Рис. 9. Осциллограммы. 1 – импульс тока на выходе инжектора (чувствительность 14 мА/В), 2 – ток на цилиндре Фарадея (чувствительность 20 мА/В), 3 – высоковольтный импульс модулятора пушки, 4 – амплитуда поля в резонаторе

Полученные в ходе испытаний параметры инжектора приведены в таблице 3.

Таблица 3

Ток пушки, А	0,18
Энергия инъекции, кэВ	25
Ток пучка, А	0,14
Частота следования сгустков, МГц	2797,15
Мощность СВЧ-питания, МВт	1
Нормализованный эмиттанс, $\epsilon_{rms\ x,y}$ , $\pi \cdot$ мм-мрад,	9
Ширина энергетического спектра на полувысоте для всего импульса, %	9
Ширина энергетического спектра на полувысоте для момента времени, соответствующего максимальному полю, %	3,8
Энергия в максимуме энергетического спектра, кэВ	950

### ВЫВОДЫ

Создан компактный инжектор электронов для линейного резонансного ускорителя 10 см-диапазона и проведены его испытания. Полученные в ходе испытаний параметры пучка соответствуют расчетным и удовлетворяют поставленным требованиям при разработке инжектора. В дальнейшем мы планируем провести измерение протяженности электронных сгустков, а также исследовать условия возникновения неустойчивости поля в резонансной системе и влияние переходных процессов на параметры пучка. После завершения этих исследований инжектор будет установлен на ускоритель [3].

### ЛИТЕРАТУРА

1. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, V.A. Kushnir, et al. *Bunching systems of electrons on base evanescent waves*. PAC'03, Portland, 2003, p.1605-1607.

2. S.A. Perezhogin, N.I. Ayzatsky, K.Yu. Kramarenko, et al. *The optimization of the electron injector resonant system based on the evanescent oscillations*. PAC'05, Knoxville, 2005, p.3170.
3. M.I. Ayzatsky, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko et al. *The electron injector for linac of the "NESTOR" storage ring // Problems of atomic science and technology. Ser. «Nuclear Physics Investigation»*. 2006, №2, p.94-96.
4. J.H. Billen, L.M. Young. *POISSON/SUPERFISH on PC compatibles*. PAC'93, Washington, 1993, p.790-792.
5. W.B. Herrmannsfeldt. *EGUN: Electron Optics Program*: Preprint, Stanford Linear Accelerator Center SLAC-PUB-6729, Stanford, USA, 1994.
6. L.M. Young. *PARMELA*: Preprint LANL LA-UR-96-1835, Los Alamos, USA, 1996, 93p.
7. V.V. Mytrochenko, A. Opanasenko, Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code // *NIM A558*, 2006, p.235-239.
8. D. Palmer, R. Miller, H. Winick. *Microwave measurements of the BNL/SLAC/UCLA 1.6 cell photocathode RF gun*. PAC'95, Dallas, 1995, p.982-984.
9. A.I. Zykov, V.I. Smolin, G.D. Kramskoy, et al. Device for an input and output of RF power for the diaphragmed waveguide // *Proc. of the VI Conference of Nuclear Research Center*. Kharkov, 1969, p.27.
10. F.B. Kiewiet. *Generation of ultra-short, high-brightness relativistic electron bunches*. PhD Thesis: Proefschrift; ISBN 90-386-1815-8 NUR 926 Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2003.
11. В.А. Кушнир, В.В. Митроченко. Методика автоматического определения собственной частоты резонатора // *ИТЭ*. 1998, №2, с.67-70.
12. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, K.Yu. Kramarenko. *The investigations of the beam characteristics in the electron injector based on resonance system with evanescent oscillations*. RuPAC XIX, Dubna, 2004, p.444-446.

### COMPACT ELECTRON INJECTOR FOR S-BAND LINAC

*M.I. Ayzatskiy, P.G. Gurtovenko, V.F. Zhiglo, E.Yu. Kramarenko, V.M. Kodyakov, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, A.M. Opanasenko, S.A. Perezhogin, A. Ponomarenko, V.V. Seleznev, D.L. Stepin, I.V. Khodak*

The results of simulation of electron dynamics as well as description of design features and test results of the injector. The injector was created on the basis of resonator structure with exponentially increasing amplitude of the electric field along an axis are presented in the work. The injector is supplied with RF power via a rectangular-to-coaxial waveguide transition to provide axial symmetry of the accelerating field. The injector was designed to provide the output current up to 1 A at particle energy up to 1 MeV.

### КОМПАКТНИЙ ІНЖЕКТОР ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ ЛІНІЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРИСКОРЮВАЧА 10 см-ДІАПАЗОНУ

*М.І. Айзацький, П.Г. Гуртовенко, В.Ф. Жигло, К.Ю. Крамаренко, В.М. Кодяков, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, А.М. Опанасенко, С.О. Пережогін, І. Пономаренко, В.В. Селезнев, Д.Л. Степін, І.В. Ходак*

Наведено результати розрахунку динаміки електронів, опис конструкції і результати випробувань інжектора, створеного на основі структури резонатора з експоненціально наростаючою амплітудою електричного поля уздовж осі. Для забезпечення аксіальної симетрії прискорюючого поля зв'язок резонаторної структури з хвилеводом НВЧ-живлення здійснюється через коаксіально-хвилеводний перехід. Інжектор розрахований на вихідний струм до 1 А при енергії прискорених частинок до 1 МеВ.