

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

В.Л. Ауслендер, И.Г. Макаров, Г.И. Кузнецов,
Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов, Г.В. Сердобинцев,
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, К.Н. Чернов,
В.Г. Ческидов

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ
СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
300 кВт ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 5 МэВ

ИЯФ 2008-8

Новосибирск
2008

**Численные и экспериментальные исследования
возможности создания промышленного
300 кВт линейного ускорителя электронов на энергию 5 МэВ**

*В.Л. Ауслендер, И.Г. Макаров, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Острейко,
А.Д. Панфилов, Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий,
М.А. Туунов, К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

Институт Ядерной Физики им. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе представлена концепция мощного (300 кВт) линейного ускорителя электронов на энергию 5 МэВ для промышленных применений, основанная на опыте разработки высокочастотных ускорителей в ИЯФ СО РАН. Приведены результаты предварительных численных и экспериментальных исследований ускоряющей структуры, способа инжекции и динамики пучка в ускорителе.

Показана возможность создания ускорителя с высокими эксплуатационными характеристиками.

© *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

1. Введение

В последнее время повышен интерес к радиационным технологиям с использованием гамма-квантов ввиду их глубокой проникающей способности. В частности, это имеет важное значение для решения задач пастеризации широкого спектра пищевых продуктов и дезинфекции почтовых отправок. Однако, из-за малой эффективности преобразования электронов с энергией до 5 МэВ (допустимый предел энергии электронов, разрешенный к применению в пищевой промышленности к моменту проведения работы) в тормозное излучение, приемлемая интенсивность гамма-излучения с мишени может быть получена в случае использования электронных пучков со средней мощностью в несколько сотен кВт. Целью данной работы является разработка высокоэффективного электронного ускорителя со средней мощностью в пучке 300 кВт. Проектные параметры ускорителя приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Кинетическая энергия электронов	5 МэВ
Средняя мощность пучка	300 кВт
КПД ускоряющей структуры	>70%

Важнейшим параметром промышленных ускорителей является эффективность (КПД) преобразования энергии источника ВЧ мощности в энергию заряженных частиц. Эффективность ускоряющей структуры определяется как отношение мощности пучка к сумме мощности пучка и мощности затрачиваемой на создание ускоряющего поля.

Существование различных типов ускорителей, предназначенных, в частности, и для радиационных технологий, делает актуальной задачу их сравнения. В настоящее время известно, по крайней мере, два типа ускорителей для промышленных применений в диапазоне энергий 5–10 МэВ со средней проектной мощностью в пучке до 200 кВт.

Высокая эффективность этих промышленных ускорителей достигается одним из двух способов:

1. Многократным прохождением частицами одного или нескольких ускоряющих промежутков. За счет большой загрузки током пучка

достигается высокий КПД преобразования. Примером такого ускорителя является "Rhodotron ТТ300" [1], в котором пучок проходит резонатор 10 раз и на выходе имеет энергию 10 МэВ. Проектные параметры: мощность в пучке 220 кВт, КПД ускоряющей структуры $\approx 73\%$, рабочая частота 107.5 МГц.

2. Наиболее распространенным типом линейных ускорителей являются машины, работающие в импульсном режиме. Их высокая эффективность обеспечивается значительной нагрузкой ускоряющих структур импульсным током ускоряемых частиц. Одним из таких ускорителей является ускоритель SureBeam Corporation с проектной мощностью 150 кВт, КПД преобразования около 70% и энергией электронов 5 МэВ, работающий на частоте 1.3 ГГц [2].

Опыт создания широкой гаммы ускорителей в ИЯФ и сравнительный анализ параметров известных промышленных импульсных линейных ускорителей (созданных за рубежом и в России) показывает, что конкурентоспособный ускоритель электронов на энергию 5 МэВ и средней мощностью в пучке 300 кВт может быть создан при успешном решении следующих задач:

- 1) получение большого коэффициента передачи ВЧ мощности частицам (эффективность) и поддержание амплитуды и фазы ускоряющего поля в нужных пределах (стабильность);
- 2) получение достаточно узкого энергетического спектра ускоренных электронов;
- 3) разработка простого способа инъекции пучка, например, как в ИЛУ-10 [3] с помощью триодной ВЧ пушки, ограничивающей фазовую протяженность частиц ускоряемого пучка;
- 4) разработка простой в изготовлении (желательно одностеночной) конструкции ускоряющей структуры с высокоэффективной системой охлаждения;
- 5) транспортировка, практически без потерь, мощного электронного пучка через ускоряющую структуру без использования магнитостатических линз;
- 6) разработка ВЧ-системы с генератором в режиме самовозбуждения, с цепью обратной связи через резонатор, для улучшения эксплуатационных характеристик ускорителя.
- 7) подавление мультипактора в случае его возникновения, например, путем покрытия нитридом титана поверхности резонаторов.

Решение указанных выше задач позволит существенно упростить конструкцию ускорителя и, следовательно, уменьшить стоимость всего ускорителя, повысить его надежность и уменьшить эксплуатационные расходы.

2. Предварительное рассмотрение проекта

Ускоритель должен обладать высоким электронным КПД $> 70\%$ и средней мощностью 300 кВт в пучке с энергией 5 МэВ. Высокий КПД преобразования ВЧ мощности в мощность пучка возможен при использовании импульсного режима работы. При заданной импульсной мощности генератора он запишется в виде $\eta_e = 1 - \frac{P_{пот}}{P_{ген}}$.

Мощность, затрачиваемая в структуре на создание ускоряющего поля, равна

$$P_{пот} = \frac{U^2}{2R_{ш}} \quad , \quad (2.1)$$

где $P_{пот}$ – мощность потерь в структуре, eU – энергия ускоренных электронов.

Шунтовое сопротивление ускоряющей структуры равно

$$R_{ш} = \rho \cdot T^2 \cdot Q \quad , \quad (2.2)$$

где ρ – характеристическое сопротивление структуры, Q – добротность, T – коэффициент пролетного времени.

На рис. 2.1 показана эффективность ускоряющей структуры в зависимости от ее шунтового сопротивления при различных значениях ВЧ мощности генератора. При мощности генератора 3 МВт для получения КПД $> 70\%$ шунтовое сопротивление должно быть $R_{ш} > 14 \text{ М}\Omega$.

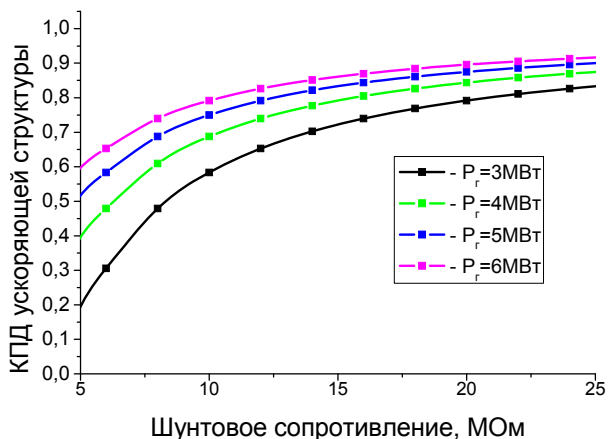


Рис. 2.1. Зависимость КПД ускоряющей структуры от ее шунтового сопротивления.

Для достижения высокого КПД ускорителя необходимо использовать ускоряющую структуру, состоящую из нескольких связанных ускоряющих резонаторов (ячеек). Шунтовое сопротивление такой структуры увеличивается пропорционально количеству ячеек, а связь между электромагнитными полями в соседних ячейках обеспечивает работу такой структуры как “одного” резонатора.

Был предложен вариант бипериодической ускоряющей структуры с резонаторами связи на оси. Форма ускоряющих резонаторов аналогична ускоряющему резонатору ИЛУ-8 [4]. Рабочая частота 178 МГц, рабочий вид колебания – $\pi/2$. Выбранная относительно низкая рабочая частота, позволяет использовать генератор на мощных электронных лампах, обладающих высоким КПД, в частности, диакрод ТН628 (КПД $\cong 73\%$, импульсная мощность 3 МВт). На этой частоте появляется возможность разработать триодную ВЧ-пушку, обеспечивающую ток в микроимпульсе до 7 А при напряженности электрического поля на сетке 80 кВ/см. На рабочей частоте 178 МГц, в структуре без заметного уменьшения шунтового сопротивления, можно допустить большие размеры пролетных отверстий ($\varnothing 70$ мм.). Это способствует (наряду с другими причинами) прохождению тракта ускорителя частицами пучка с незначительным токооседанием без применения магнитостатических линз.

Предварительные расчеты параметров ускоряющей структуры показывают, что в ней будет рассеиваться около 100 кВт средней мощности. Размеры структуры на рабочей частоте 178 МГц позволяют выполнить эффективную систему охлаждения, снимающую мощность более 100 кВт.

3. БЛОК-схема ускорителя

На рис. 3.1 представлена блок-схема ускорителя.

Основными элементами ускорителя являются: ускоряющая структура, ВЧ генератор, триодная электронная пушка и конвертор. Источником ВЧ мощности служит двухкаскадный усилитель, возбуждаемый сигналом от ускоряющей структуры через фазовращатель, обеспечивающий правильную фазировку в цепи обратной связи. Для получения импульсной мощности 3 МВт и порядка 450 кВт средней мощности в выходном каскаде генератора предполагается использовать диакрод ТН628. Он был испытан на стенде фирмы “Thales”. Получено 3 МВт импульсной мощности и 600 кВт средней мощности [5].

Анодное питание ВЧ генератора осуществляется от импульсного модулятора. Его импульсная мощность должна быть порядка 6 МВт при средней мощности около 1 МВт. Напряжение: 24 кВ и 10 кВ соответственно для выходного и предварительного каскадов.

Электронная пушка – триодная. На ее катодно-сеточный контур подается напряжение второй гармоники с целью уменьшения токооседания

электронов пучка и их энергетического разброса. Сдвиг по фазе этого напряжения регулируется фазосдвигающей линией.

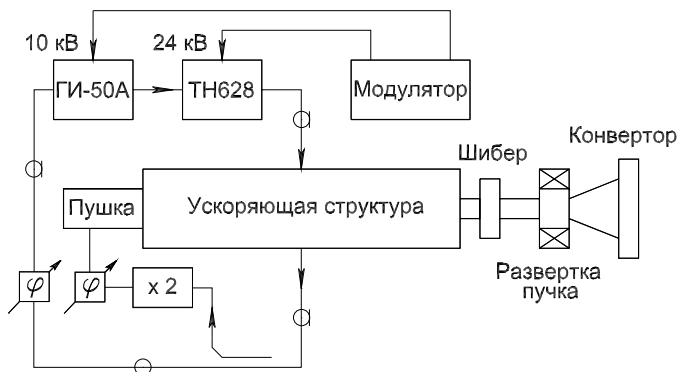


Рис. 3.1. Блок-схема ускорителя.

Конвертер располагается на выходе ускорителя и служит для преобразования энергии электронного пучка в тормозное излучение.

Двухкаскадная схема генератора выбрана с целью увеличения выходной мощности, оптимальной настройки выходного каскада и облегчения режима работы фазовращателя в цепи обратной связи. На первом этапе испытаний ускорителя предполагается использовать ВЧ-генератор ускорителя ИЛУ-8 на триоде GI-50A, до 3 МВт импульсной и 30 кВт средней мощности.

4. Ускоряющая структура

Выбор ускоряющей структуры определяется особенностями конкретной установки и во многом влияет на физические и эксплуатационные параметры ускорителя. Существование множества типов ускоряющих структур, предназначенных для ускорения пучков заряженных частиц, требует сравнения их многочисленных параметров. Создание промышленного ускорителя большой мощности подразумевает анализ не только электродинамических характеристик, но и сравнение коммерческих показателей, таких как стоимость изготовления, надежность работы и эксплуатационные расходы. Большая часть этих характеристик являются противоречащими друг другу. Например, среди основных характеристик можно выделить шунтовое сопротивление, показывающее эффективность использования высокочастотной мощности для ускорения частиц, и коэффициент связи, определяющий чувствительность ускоряющей структуры к различного рода возмущениям: погрешностям изготовления и настройки, тепловым деформациям и т.д. Увеличение коэффициента связи приводит к

уменьшению чувствительности к возмущениям, что в конечном итоге уменьшает стоимость изготовления, однако, уменьшает при этом шунтовое сопротивление и затрудняет охлаждение резонаторов.

4.1. Оптимизация ускоряющей структуры

Реализация принятой концепции ускорителя, в которой предусматривается, в частности, внутренняя инжекция электронов и проведение их в тракте ускорителя без применения магнитостатических линз, оказало значительное влияние при оптимизации не только профиля ускоряющих ячеек, но и характерных размеров ускорителя в целом.

Ускоряющая структура формируется из полных резонаторов и половинных на ее концах. Профиль и расчетные параметры оптимизированных резонаторов приведены ниже (см. рис. 4.1, 4.2 и таблицы 2, 3). Расчеты проводились программой SuperLANS [6].

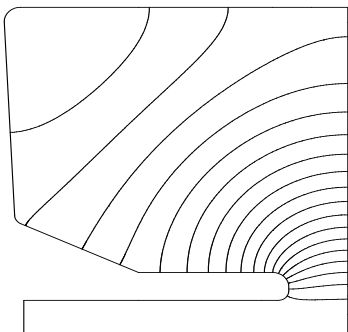


Рис. 4.1 Оптимизированный профиль половинного ускоряющего резонатора. (расчет программой SuperLANS).

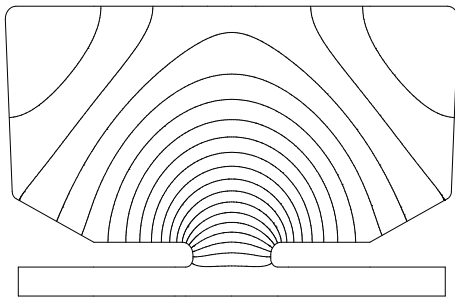


Рис. 4.2. Оптимизированный профиль полного ускоряющего резонатора. (расчет программой SuperLANS).

Таблица 2. Параметры половинного резонатора.

Частота (МГц)	179.80
Добротность	28563
Коэффициент пролетного времени ($\beta=1$)	0.996
Шунтовое сопротивление (МОм)	3.0

Таблица 3. Параметры полного резонатора

Частота (МГц)	179.806
Добротность	32900
Коэффициент пролетного времени ($\beta=1$)	0.9867
Шунтовое сопротивление (МОм)	6.8

Приведенные выше параметры ячеек (резонаторов) рассчитаны программой SuperLANS без учета влияния отверстий связи (резонансная частота выше), а величины шунтовых сопротивлений определены при $\beta = 1$.

На рис. 4.3 приведена мощность потерь в структуре (энергия ускоренных электронов 5 MeV) в зависимости от количества полных резонаторов (пунктирная кривая).

Фактически потери будут выше, но не более чем в 1.5 раза. При импульсной мощности генератора 3 МВт четыре полных резонатора позволят получить КПД >70%.

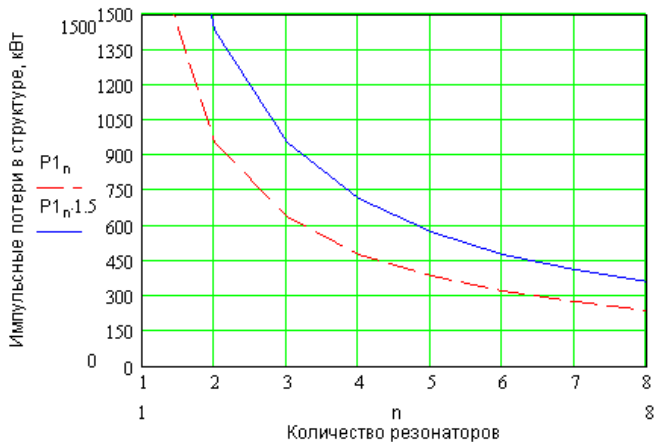


Рис. 4.3. Потери в структуре в зависимости от количества резонаторов.

Разброс частот ячеек и коэффициентов связи между ячейками, вызванный неточностями изготовления и настройки, приводит к неравномерности ускоряющего поля вдоль структуры, а также к появлению поля в ячейках связи, что приводит к дополнительным потерям мощности и, следовательно, к снижению шунтового сопротивления структуры.

Для определения требуемой точности изготовления ячеек структуры полезно определить величины производных частоты по их размерам.

На рис. 4.4 представлены величины производных частоты по характерным размерам (чувствительность к погрешностям изготовления и деформациям). Видно, что наибольшее влияние на частоту имеют величины пролетных зазоров в ячейках связи $S2 = 3.2$ МГц/мм и в ускоряющих ячейках $S1 = 0.45$ МГц/мм. При работе на моде $\pi/2$ в ячейках связи даже при наличии потерь запасается незначительная энергия, поэтому влияние их собственных частот на параметры структуры малы. Основное влияние на неравномерность ускоряющего поля и уменьшение шунтового сопротивления оказывает разброс частот ускоряющих ячеек.

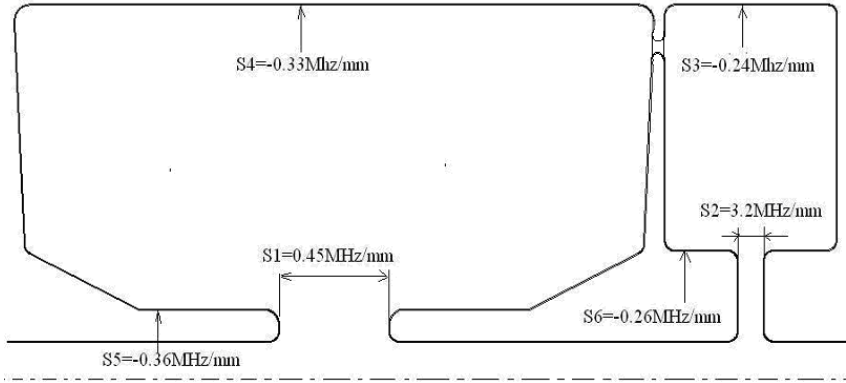


Рис. 4.4. Степень влияния изменения размеров на частоту:
S1, S2 – Влияние зазоров; S3–S6 – влияние диаметров.

Неравномерность поля и уменьшение шунтового сопротивления можно определить численно для структуры с небольшим числом ячеек, используя программу SuperLANS, и моделируя реальную связь посредством кольцевой щели (структура 2D). На рис. 4.5 представлен результат этого расчета. Расчет проводился при разбросе частот двух ускоряющих ячеек: половинной на $\Delta f/f = +5 \cdot 10^{-3}$ и полной на $\Delta f/f = -5 \cdot 10^{-3}$. Видно нарушение равномерности ускоряющего поля вдоль структуры и появление поля в ячейках связи. Уменьшение шунтового сопротивления составляет около 3%, что согласуется с результатами, полученными по формуле [7]:

$$\left(\frac{\Delta sh}{Rsh} \right) = \frac{Q_a}{Q_c} \frac{4(N-1)}{k^2} \sigma^2, \quad (4.1)$$

где Q_a – добротность ускоряющей ячейки, Q_c – добротность ячейки связи, k – коэффициент связи, $\sigma = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}f}$. Таким образом, коэффициент связи 7 – 8%

обеспечивает достаточную стабильность параметров структуры при расстройках ускоряющих ячеек в пределах $\Delta f/f = \pm 5 \cdot 10^{-3}$.

Для вычисления коэффициента связи и девиации собственных частот ячеек из-за влияния щели воспользуемся соотношениями [8]:

$$k \cong -\frac{Z_h}{Z_0} \cdot N \cdot \frac{l^3 h}{6} \cdot H_a \cdot H_c, \quad (4.2)$$

$$f_{a,c} \cong f_{0a,0c} \left(1 - k \frac{H_{a,c}}{H_{c,a}} \right)^{-0.5}, \quad (4.3)$$

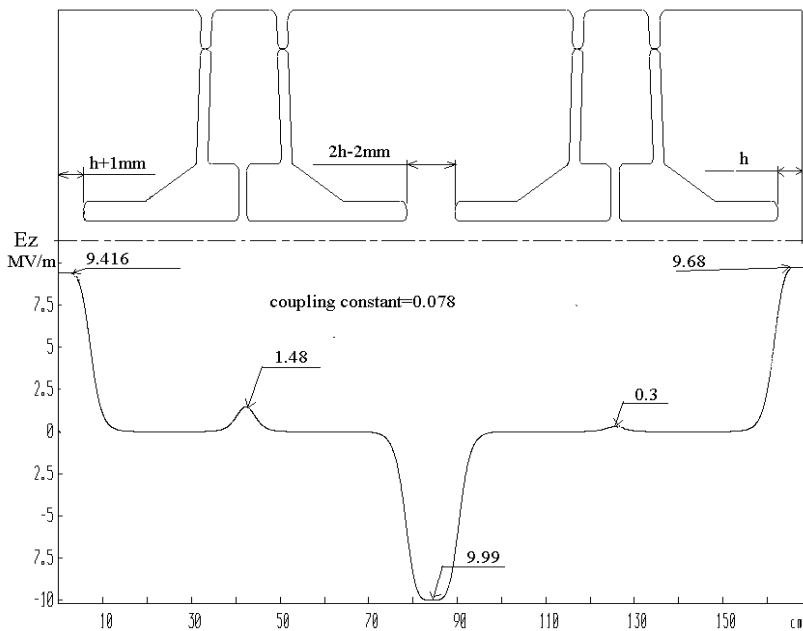


Рис. 4.5. Флуктуации полей E_z в ячейках при отличии частот ячеек:
 а) половинной $\Delta f/f = +5 \cdot 10^{-3}$; в) полной $\Delta f/f = -5 \cdot 10^{-3}$.

где $f_{0a,0c}$ – собственные частоты ячеек без щелей связи, k – коэффициент связи, определяемый как $k \cong \frac{f_\pi - f_0}{f_{\pi/2}}$, f_π , $f_{\pi/2}$, f_0 – частоты видов колебаний π , $\pi/2$, 0 соответственно, $\frac{Z_h}{Z_0}$ – относительное волновое сопротивление щели связи, представленной в виде симметричной двухпроводной линии, Δ – высота щели и t – толщина стенки,
 $H_a \cdot H_c$ – нормированная напряженность азимутального магнитного поля на щелях связи со стороны ускоряющей ячейки или ячейки связи, определяемые условиями нормировки $H_{z_{a,c}} = \frac{\mu \cdot H^2_{a,c}(r_h)}{2 \cdot W}$, W – энергия, запасенная в ячейках (при амплитуде магнитных полей на щели $H_{a,c}(r_h)$).

Приближенные аналитические соотношения (4.2), (4.3) полезны для определения необходимой точности изготовления щели. На рис. 4.6а

приведены результаты расчетов коэффициента связи. Девиация собственных частот ячеек в зависимости от азимутальной протяженности щели показана на рис. 4.6б. Используя соотношения (4.1), (4.2), (4.3), можно определить влияние разброса размеров щелей связи при изготовлении на величину шунтового сопротивления. Изготовление щелей с точностью ± 1.5 мм приемлемо, так как приводит к уменьшению шунтового сопротивления не более чем на 2%.

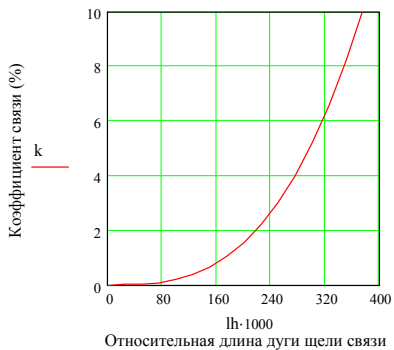


Рис. 4.6а. Зависимость коэффициента связи от азимутальной протяженности щели.

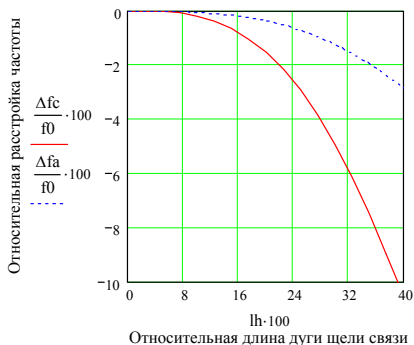


Рис. 4.6б. Зависимость изменения собственных частот ячеек от азимутальной протяженности щели.

На последнем этапе разработки оптимизация структуры проводилась с помощью трехмерной программы CST Microwave Studio. На рис. 4.7 приведен общий 3D вид ускоряющей структуры, а в таблице 4 основные расчетные параметры.

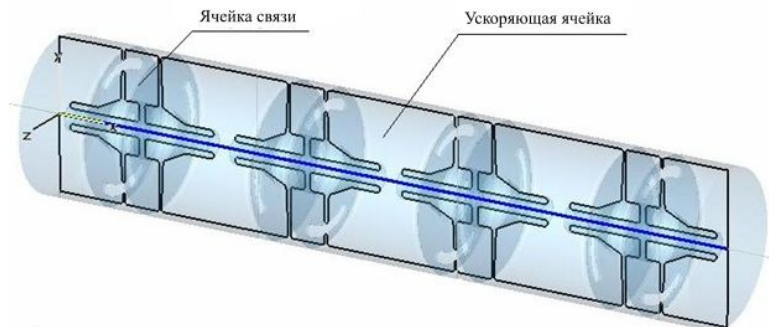
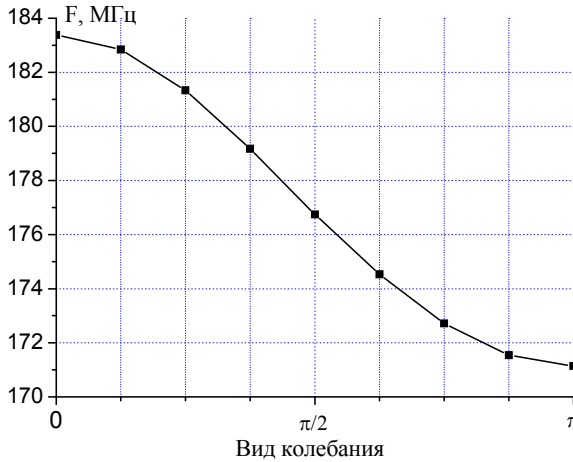


Рис. 4.7. Общий вид ускоряющей структуры (9 ячеек).

Таблица 4

Частота, МГц	176.8
Добротность	22000
Пролетный фактор	0.986
Характеристическое сопротивление, Ом	826
Шунтовое сопротивление, МОм	~18



На рис. 4.8. приведена расчетная дисперсионная кривая бипериодической ускоряющей структуры. Коэффициент связи вычисляется по частотам крайних видов колебаний дисперсионной характеристики структуры и равен 0.069.

Для проверки результатов расчета была изготовлена модель в масштабе 5:1 из пяти ячеек. Общий вид модели на испытательном стенде показан на рис. 4.9. Азимутальная протяженность щелей 76° . Щели на противоположных стенках ячейки связи развернуты друг относительно друга на 90° . Расчетный коэффициент связи ускоряющих ячеек через ячейку связи равен $K_1 = 0.2\%$.

Результаты измерений частот связи приведены на рис. 4.10. Измеренный коэффициент связи ($k = 0.073$) и расчетный совпадают с точностью 5%. Частоты достаточно симметричны относительно рабочей частоты, что указывает на хорошее совпадение парциальных частот ячеек и на незначительную величину связи через ячейку.

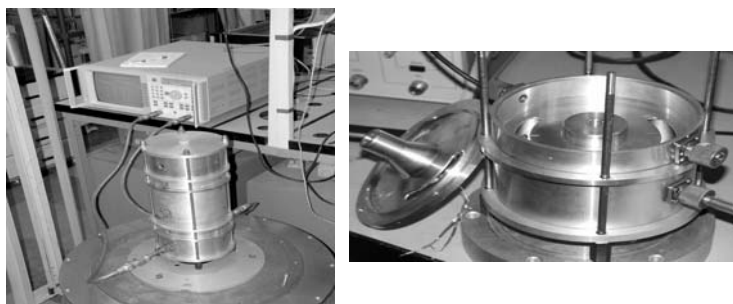


Рис. 4.9. Модель ускоряющей структуры на испытательном стенде.

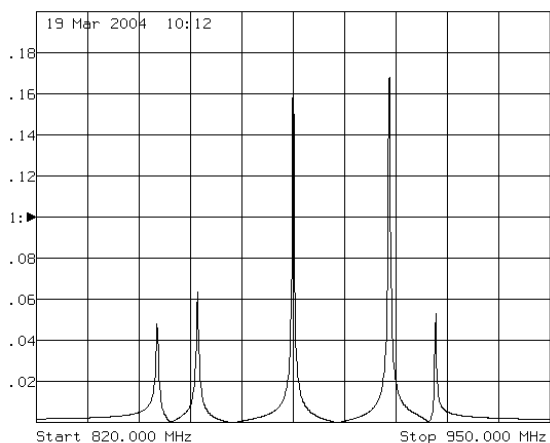


Рис. 4.10. Измерение частот связи на модели (5 ячеек). Частота вида $\pi/2$ равна 885 МГц.

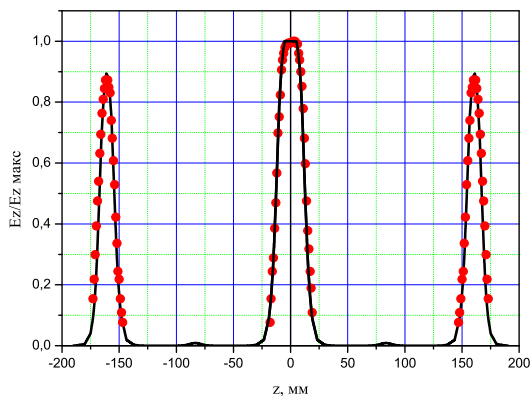


Рис. 4.11. Распределение напряженности электрического поля в модели ускоряющей структуры. Точки – результаты эксперимента, непрерывная кривая – результат расчета.

Технологическое оборудование ИЯФ позволяет изготовить резонаторы структуры с необходимой точностью $\sim 10^{-3}$.

4.2. Оценка нарушения аксиальной симметрии ускоряющего поля

Известно, что электромагнитные поля аксиально-несимметричных отверстий связи в стенках ячеек ускоряющей структуры, могут оказывать фокусирующее или дефокусирующее действие на ускоряемый пучок, в результате чего сечение пучка становится несимметричным на выходе ускорителя. Впервые этот эффект экспериментально наблюдался на линейном ускорителе позитронного источника комплекса ВЭПП-4 [9] и приводил к поперечной эллиптичности пучка на конверторе. Тогда же была дана численно-аналитическая оценка несимметричных возмущений ВЧ полей и предложен способ борьбы с этим явлением [10].

Наличие двух отверстий связи в стенках ячеек ускоряющей структуры приводит к образованию квадрупольных возмущений ВЧ полей (квадрупольных ВЧ линз). Если отверстия в противоположных стенках ячейки расположены со сдвигом на 90 градусов друг относительно друга (Н-ориентация), то поля квадрупольных линз складываются. Если же отверстия расположены друг напротив друга (Т-ориентация), то поля вычитаются, и их влияние на ускоряемые частицы в значительной мере компенсируется.

Проведен численный расчет величины квадрупольных возмущений полей [11]. Расчет проводился для участка структуры, состоящего из одной ускоряющей ячейки и двух полуячеек связи с помощью [программы CST Microwave Studio](#). ВЧ поля рассчитывались для двух вариантов взаимного расположения щелей связи. Число ячеек сетки было выбрано около 2500000, что соответствует примерно 50-ти разбиениям сетки на длине волны. Следует отметить, что при более грубых разбиениях не удавалось выделить малую квадрупольную добавку (порядка 10^{-4} от величины ускоряющего поля) с приемлемой точностью.

На рис. 4.12 представлено нормированное распределение азимутальной компоненты электрического поля вдоль окружности в поперечной плоскости по центру ускоряющего зазора при Н-ориентации щелей. Видно, что поле имеет квадрупольный характер.

На рис. 4.13 показаны расчетные распределения квадрупольной компоненты ВЧ электрического поля в ускоряющих ячейках позитронного источника ВЭПП-4 и 5 МэВ ускорителя 178 МГц. Распределение взято вдоль оси ускоряющей ячейки на половинном радиусе апертуры. Значение градиента квадрупольного поля в коаксиальной ускоряющей ячейке на порядок меньше, чем в ускоряющей ячейке позитронного источника ВЭПП-4. Таким образом, при расположении щелей связи в ускоряющих ячейках друг против друга, влиянием квадрупольных компонент поля на поперечную динамику пучка можно пренебречь.

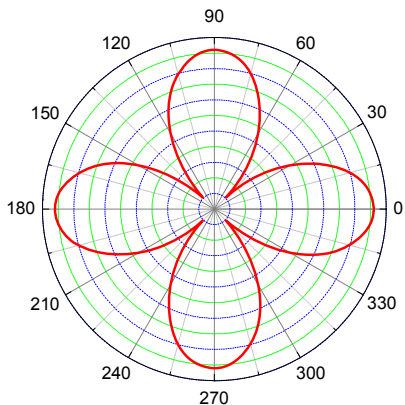


Рис. 4.12. Распределение азимутальной компоненты электрического поля.

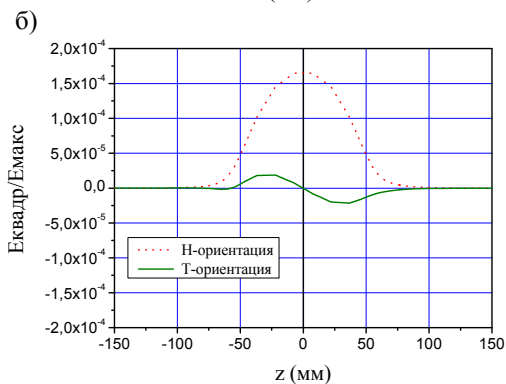
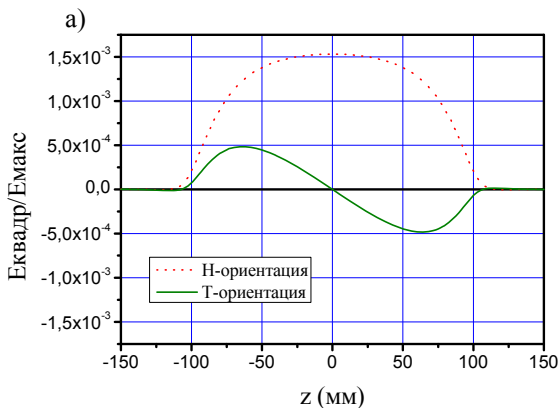


Рис. 4.13. Расчетные распределения квадрупольной компоненты электрического поля вдоль оси ускоряющей ячейки: а) позитронного источника ВЭПП-4; б) 5-МэВ ускорителя – 178 МГц.

4.3. Конструкция ускорителя

На рис. 4.14 показаны два элемента периодичности (модули) ускоряющей структуры.

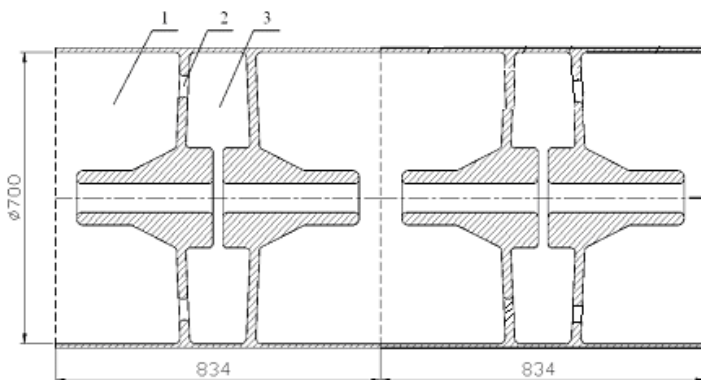


Рис. 4.14. Два модуля ускоряющей структуры: 1 – ускоряющий резонатор, 2 – щель связи, 3 – резонатор связи.

Требуется порядка 0.74 МВт импульсной ВЧ мощности для того, чтобы создать необходимый ускоряющий градиент для получения пучка электронов с энергией 5 МэВ на четырех модулях структуры. Здесь учтено снижение добротности на 25% из-за влияния щелей связи и на 10 – 15% из-за шероховатости поверхности, наличия фланцев и т.д. Используя источник питания с выходной мощностью 3 МВт можно передать пучку мощность порядка 2.25 МВт. Такая мощность может быть получена от диакрода ТН628. При этом эффективность преобразования ВЧ-мощности в мощность пучка ускоренных электронов составит более 70%. При средней мощности в пучке 300 кВт, скважность будет 7.5. В этом случае, в каждой ускоряющей ячейке структуры выделяется 22.5 кВт средней мощности. В концевых ячейках (рис. 4.15) выделяется по 13 кВт.

Нагрев резонатора является основным фактором, вызывающим изменение собственных частот резонаторов структуры. Работа ускорителя не предполагает синхронизацию по ВЧ и поэтому не накладывает жестких требований на стабильность его рабочей частоты. Возбуждение структуры осуществляется автогенератором с цепью обратной связи через ячейку структуры. Поэтому здесь важным является не величина тепловых уходов собственных частот резонаторов, а их отличие. Для придания предсказуемости перемещений торцевых стенок резонаторов при тепловых деформациях им придан конусообразный профиль. Абсолютные величины деформаций торцевых стенок будут незначительны в силу применения высокоэффективного охлаждения (см. раз.4.4). Следует отметить, что нагрев поверхности резонаторов приводит также к увеличению потерь вследствие

уменьшения проводимости меди. В нашем случае этим эффектом можно пренебречь.

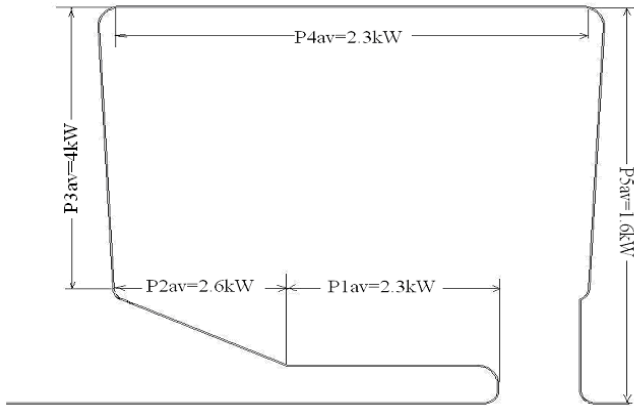


Рис. 4.15. Распределение средней мощности потерь в половинной ячейке. Значение P_{3av} приведено с учетом щели связи.

Ускоряющая структура состоит из четырех модулей и образует три полных и два концевых (половинных) ускоряющих резонаторов и четырёх резонаторов связи. Резонаторы изготавливаются из бескислородной меди. Общий вид ускоряющей структуры приведен на рис 4.16.

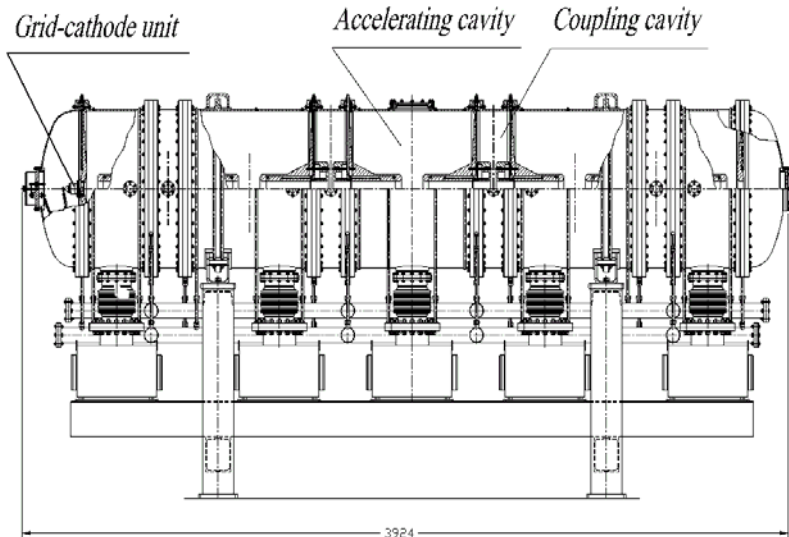


Рис. 4.16. Общий вид ускоряющей структуры.

Полный ускоряющий резонатор представляет собой коаксиальную, С-образную в продольном по оси резонатора сечении, полость, состоящую из трёх частей: наружная обечайка, два вертикальных диска с цилиндрическими электродами, обращёнными друг к другу, образующими ускоряющий зазор 110мм. Вертикальные стенки имеют щелевые по азимуту окна связи. Наружная обечайка имеет три фланца: многощелевое отверстие для подключения магниторазрядного вакуумного насоса, отверстие для измерителя поля резонатора, фланец для ввода мощности и фланец для петли обратной связи.

Резонаторы связи состоят из наружной обечайки, соединяющей основные резонаторы, и электродов, закреплённых на обратной стороне дисков основных резонаторов. Для соединения элементов резонаторов применена высокотемпературная пайка в вакуумной печи медносеребряным припоем ПСр72.

Структура возбуждается в плоскости симметрии, при этом количество частот связи уменьшается с 9 до 5, что удаляет в окрестности рабочей моды соседние частоты связи.

Охлаждение резонаторов осуществляется водой, подводимой отдельной ветвью к каждому из внутренних электродов и к каждой вертикальной стенке с помощью медных трубок. Наружная обечайка имеет напаянную на наружной поверхности шинку квадратного сечения с внутренним отверстием для охлаждающей воды.

Сборка структуры производится вертикально вверх на сборочной подставке, установленной рядом с основной подставкой. Собранные последовательно друг с другом через индиевые уплотнители с помощью шпилек основные резонаторы и резонаторы связи формируют вакуумный объём ускоряющего блока. Торцы блока закрыты дополнительными крышками, воспринимающими атмосферное давление. После окончательной сборки блок с помощью грузоподъёмного устройства укладывается в горизонтальное положение на основную подставку, на которой также закрепляются на своих площадках магниторазрядные насосы и водяной коллектор для охлаждающей воды.

Преимущества этой ускоряющей структуры: простота одностеночной конструкции, удобное охлаждение, высокое сопротивление к тепловым деформациям.

4.4. Система охлаждения ускоряющей структуры

Были рассмотрены различные варианты охлаждения. Расчёты проводились программой SAM [12], специально модифицированной Тиуновым М.А. На рис. 4.17 приведены результаты расчётов нагрева коаксиальной части резонатора для двух геометрий при охлаждении с помощью радиальных каналов в торцевых стенках для протока воды.

Распределение мощности потерь по поверхности резонаторов проводилось программой SuperLANS при одинаковых величинах напряжения на ускоряющем зазоре. Видно, что охлаждение резонатора конструкции, показанной на рис. 4.17а, малоэффективно. Охлаждение резонатора конструкции, представленной на рис. 4.17б приемлемо, однако шунтовое сопротивление этого резонатора на 10 % меньше, чем у резонатора на рис. 4.17а.

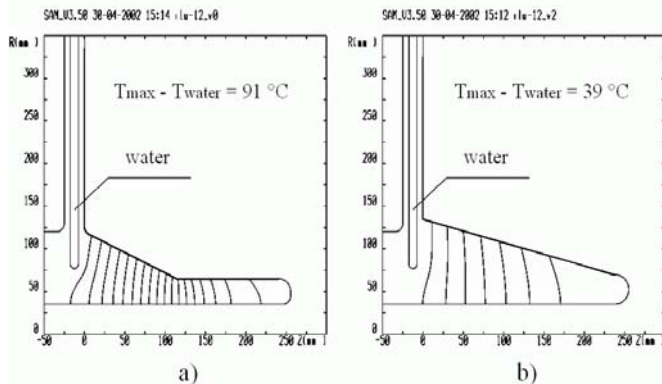


Рис. 4.17. Нагрев центральной части резонатора для двух геометрий. (Разность температур между изотермическими кривыми составляет 5°C).

Поэтому была проработана система более эффективного охлаждения коаксиальной части и дисков резонатора профиля (см. рис. 4.17а) с помощью напаянных трубок с водой. Расчетная схема охлаждения представлена на примере концевой (половинного) резонатора рис. 4.18.

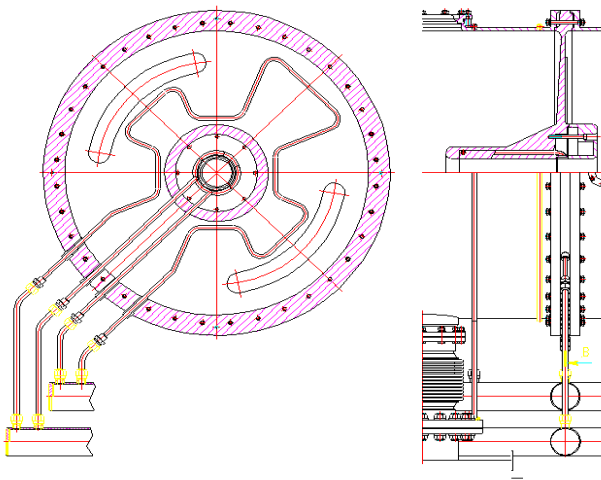


Рис. 4.18. Схема охлаждения коаксиальной части и диска.

Наиболее нагруженным по тепловыделению является коаксиальный электрод резонатора, на наружной поверхности которого выделяется 5 кВт средней тепловой мощности. Электрод имеет свою водяную ветвь охлаждения в виде медной трубки внутренним диаметром 8 мм, уложенной внутри электрода вблизи наружной поверхности. Общая длина охлаждающей трубки от впускного водяного коллектора до выпускного – 3 м. Расход воды при перепаде давления на входе и выходе в 3 атм составит 18,9 л/мин. Изогнутая радиусами при укладке трубка имеет местные потери напора в сумме равные 0,52 атм. Следовательно, реальный расход воды составит 17,2 л/мин. При перепаде температуры воды на входе и выходе в 10°C такое количество воды способно снять 11,9 кВт тепла. Средней температуре воды 25°C и средней скорости движения воды 5,7 м/сек соответствует коэффициент теплоотдачи стенка–вода) $\alpha = 20000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$. Теплосъём происходит на длине трубки 1,35 м. Перепад температуры "стенка – вода" составит 7,5°C.

Вертикальная стенка резонатора имеет свою ветвь охлаждения, выполненную такой же трубкой общей длины 3 м. Количество выделяемой средней тепловой мощности на поверхности стенки – 4 кВт. Расход воды при перепаде давления на входе и выходе в 3 атм составит 18,9 л/мин. Изогнутая радиусами при укладке трубка имеет местные потери напора в сумме равные 0,96 атм. Следовательно, реальный расход воды составит 15,4 л/мин. При перепаде температуры воды на входе и выходе в 10°C такое количество воды способно снять 10,7 кВт тепла. Средней температуре воды 25° и средней расходной скорости движения воды 5,1 м/сек соответствует коэффициент теплоотдачи "стенка – вода" $\alpha = 18500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$. Теплосъём происходит на длине трубки 2,4 м. Трубка запаяна на глубину половины диаметра. Перепад температуры "стенка – вода" составит 7°C.

Наружная обечайка резонатора охлаждается двумя параллельными ветвями, выполненными в виде напаянных на наружную поверхность медных шинок прямоугольного сечения с внутренним отверстием $\text{Ø} 8.5 \text{ мм}$. Общая длина каждой из них 3 м. Расход воды в каждой из ветвей при том же перепаде давления составит 22 л/мин. При перепаде температуры воды на входе и выходе в 10° данное количество воды способно снять 15 кВт тепла. На внутренней поверхности обечайки выделяется 2.3 кВт средней мощности. Средней температуре воды 25° и средней расходной скорости движения воды 6.35 м/сек соответствует коэффициент теплоотдачи "стенка–вода" $\alpha = 22000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$. Теплосъём происходит на длине трубки 2.2 м. Трубка запаяна на глубину половины диаметра. Перепад температуры "стенка–вода" составит 1°C. Наибольший перепад температуры по теплопроводности вдоль оси обечайки от самой горячей точки обечайки до ветви охлаждения – 9.5°C.

Входная стенка резонатора имеет свою ветвь охлаждения медной трубкой с водой общей длины 3 м. Количество тепла, выделяемого в стенке –

1.6 кВт, что в 1.6 раза меньше, чем в вертикальной стенке резонатора. Форма укладки трубки охлаждения та же самая.

Основные ускоряющие резонаторы имеют аналогичную схему охлаждения вертикальных стенок и коаксиальных электродов. Наружная обечайка ускоряющих резонаторов имеет три параллельные ветви охлаждения при таком же примерно расстоянии между охлаждающими шинами с водой. Вводы водяных трубок в вакуум конструктивно исключают наличие паяных швов, разделяющих воду и вакуум.

4.5. Ввод мощности

Разработка ввода на импульсную мощность >3 МВт при средней мощности около 450 кВт является серьезной задачей. Основные проблемы, которые необходимо решить при создании такого ввода следующие: обеспечение электрической прочности керамического изолятора; обеспечение съема тепла; нанесение антимультипакторного покрытия на части ввода, находящиеся в вакууме. Эти проблемы требуют нетривиальных технологических решений.

В институте разработан ввод мощности 180 МГц (рис. 4.19). Изготовлено и испытано несколько десятков этих вводов для резонаторов микротрона-рекуператора. При испытаниях они выдерживают 1.5 МВт импульсной мощности и более 150 кВт средней.

Для испытаний ускоряющей структуры разрабатывается ввод на импульсную мощность 3 МВт при средней мощности до 50 кВт, т.к. мощность выходного каскада испытательного стенда не превышает 50 кВт. Конструкция ввода при этом упрощается. Отсутствие дополнительного водяного охлаждения петли связи позволяет мобильно изменять связь с ускоряющей структурой.

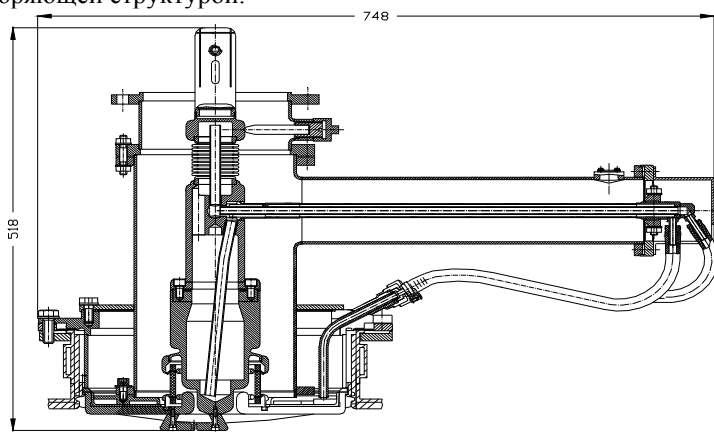


Рис. 4.19. Ввод на непрерывную мощность 150 кВт и частоту 180 МГц.

Площадь петли связи можно оценить следующим образом: от генератора мощность $P = 3$ МВт подводится по фидеру с волновым сопротивлением $Z = 50$ Ом. Напряжение на петле $U_{loop} = \sqrt{2 \cdot P \cdot Z}$ при этом достигает величины 17 кВ. С другой стороны, $U_{loop} = \frac{d\Phi}{dt}$, где $\Phi = \mu HS$. Напряженность магнитного поля в месте установки петли составляет $H = 3200$ А/м при номинальном ускоряющем напряжении (расчет программой SuperLANS). Отсюда получим следующее соотношение для определения площади петли связи:

$$S = \frac{U_{loop}}{\mu H \omega}.$$

В нашем случае она должна быть около 20 см^2 . На рис. 4.20 представлен макет петли связи. В этой конструкции индуктивность петли составляет $\sim 1.65 \cdot 10^{-7}$ Гн ($Z_L = 180$ Ом). Компенсирующая емкость ($C = 5$ пФ) выполнена в виде пластины на конце петли связи. Разделительный цилиндрический изолятор из керамики 22ХС ($\epsilon = 9.3$, $\tan \epsilon = 7e - 4$). Размеры изолятора: $D = 80$ мм, $d = 70$ мм, $h = 60$ мм. Расчеты показали, что напряженность электрического поля не превышает 10 кВ/см, тепловые потери в изоляторе с учетом скважности 7.5 около 10 Вт, а перепад температур по изолятору составляет 5°C . Такой ввод способен передать в ускоряющую структуру импульсную мощность 3 МВт при средней мощности 50 кВт. Для передачи средней мощности 450 кВт необходимо более интенсивное охлаждение петли связи.

Следует отметить, что в конструкции ускоряющей структуры имеется возможность подачи мощности через 2 или 3 ввода. Однако это решение усложняет схему подачи мощности.



Рис. 4.20. Макет петли связи.

4.5. Исследование ВЧ разряда в ускоряющей ячейке

Проведен эксперимент по преодолению вакуумного высокочастотного резонансного разряда (мультипактора) в резонаторе ИЛУ-8, размеры и форма которого близки к первой ускоряющей ячейке. Возбуждение резонатора осуществлялось от однокаскадного автогенератора на триоде ГИ-50А с обратной связью через резонатор (рис. 4.21). На анод автогенератора подавалось постоянное напряжение 1.5 кВ с последующим включением импульсного напряжения от модулятора. Амплитуда импульса до 30кВ, длительность 800 мксек. Наблюдалось несколько зон мультипактора с резким ухудшением вакуума. Преодолеть мультипактор удалось за 8 часов тренировки.

Результаты этого эксперимента показывают, что мультипактор в ускоряющих ячейках структуры преодолевается путем тренировки. Однако, возможность преодоления мультипактора во всей ускоряющей структуре не так очевидна. Это связано с наличием в структуре ячеек связи, отверстий связи и апертуры ($\varnothing 70$ мм), где возможно возникновение мультипактора. В этом случае для предотвращения мультипактора предполагается провести напыление TiN на детали ускоряющей структуры. Технология напыления на крупные детали структуры отрабатывается.

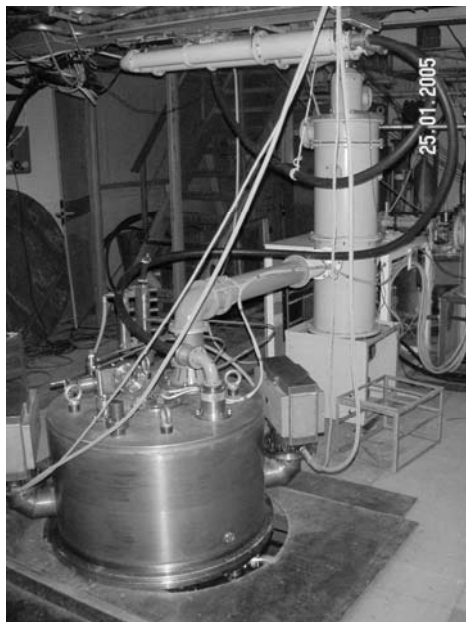


Рис. 4.21. Установка для тренировки резонатора (одной ячейки).

5. Численное и экспериментальное моделирование инжекции и динамики пучка

5.1. Постановка задачи

В ускоряющей структуре разрабатываемого 5 МэВ ускорителя поле в зазоре в 2.5 раза меньше, чем в однорезонаторном ускорителе ИЛУ-10 на ту же энергию электронов. Однако, импульсный ток пучка должен быть 420 мА, что ненамного меньше максимального импульсного тока в ИЛУ-10 (500 мА). Кроме того, особенно высокое требование в новом ускорителе предъявляется к энергетическому спектру пучка для проведения его без потерь через ускоряющую структуру и получения максимального коэффициента конверсии энергии пучка в гамма-кванты.

Для решения этих проблем, как и в других ускорителях серии ИЛУ, предлагается использовать внутреннюю инжекцию из триодной ВЧ пушки, образованной катодно-сеточным узлом, помещенным в первый полурезонатор ускоряющей структуры. Требуемый ток эмиссии сгустков электронов обеспечивается за счет проникновения в зазор сетка-катод электрического ВЧ поля из первого ускоряющего зазора структуры. Амплитуда микроимпульса тока и его фазовая протяженность регулируется путем подачи постоянного запирающего напряжения смещения на зазор сетка-катод (работа в режиме С). Для уменьшения потерь и сужения спектра пучка предполагается подавать дополнительное ВЧ напряжение смещения на зазор сетка-катод. Регулируя амплитуду и фазу этого ВЧ напряжения, можно осуществить инжекцию электронов в оптимальной фазе ускоряющего напряжения в структуре.

Для получения необходимого тока пучка требуется увеличить прозрачность сетки. Получить необходимую прозрачность путем уменьшения зазора сетка-катод на стандартной крупноячеистой сетке, используемой в ускорителях серии ИЛУ, не удастся по двум причинам. Во-первых, зазор становится меньше достижимого по точности изготовления и по электрической прочности. Во-вторых, вследствие островкового эффекта сильно возрастает нелинейность вольт-амперной характеристики и величина запирающего напряжения смещения катодно-сеточного узла.

Для увеличения прозрачности предлагается использовать щелевую сетку, ячейки которой являются щелями разной длины, но одинаковой ширины между эквидистантно натянутыми параллельными проволочками (рис. 5.1). Кроме того, что такая сетка обладает большей прозрачностью по сравнению с ячеистой сеткой, ее электронно-оптические свойства могут быть с хорошей точностью численно промоделированы в двумерном приближении [13].

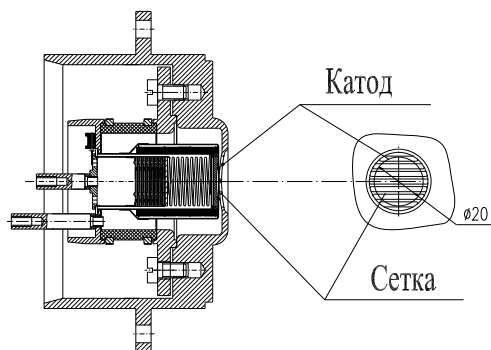


Рис. 5.1. Общий вид катодно-сеточного узла.

5.2. Моделирование внутренней инжекции

На рис. 5.2 представлена двумерная модель катодно-сеточного узла. Ее основные геометрические параметры: зазор катод-сетка d , шаг сетки h , диаметр проволочек D .

Сначала в статическом приближении с помощью программы SAM [12] проводился поиск оптимальных параметров ячейки для получения максимальной прозрачности сетки при минимальном эмиттансе пучка.

Для проверки статических вольтамперных характеристик пушки была изготовлена специальная лампа с эквидистантной сеткой и анодом из графита на расстоянии 4 мм от сетки, в которую был установлен макетный образец катодного узла из LaB_6 диаметром 20 мм (см. рис.5.3).

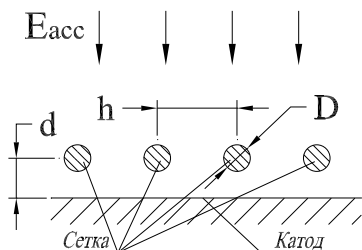


Рис. 5.2. Двумерная модель катодно-сеточного узла.

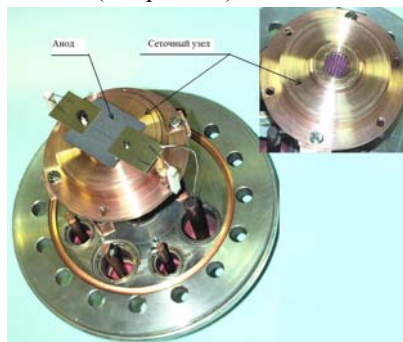


Рис. 5.3. Лампа с эквидистантной сеткой.

Лампа была помещена в вакуумный объем и испытана. Расчетные и экспериментальные зависимости среднего тока с катода от напряжения смещения приведены на рис.5.4. Они показывают близкое соответствие.

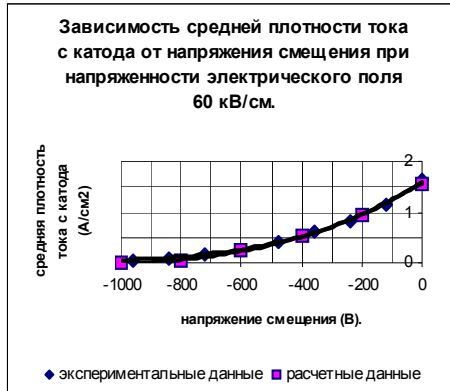


Рис. 5.4. Зависимость средней плотности тока с катода от напряжения смещения при напряженности электрического поля на аноде 60 кВ/см.

Все приведенные ниже результаты расчета катодно-сеточного узла получены для следующих оптимизированных значений геометрических параметров: $d = 1.5$ мм, $h = 3$ мм, $D = 1$ мм.

Окончательный расчет ячейки катодно-сеточного узла проводился с помощью программы ExtraSAM [13], модернизированной для расчета зависящей от времени эмиссии с катода в режиме ограничения пространственным зарядом пучка и с учетом времяпролетных эффектов. На рисунке 5.5 приведены результаты этих расчетов при значении амплитуды ускоряющего поля в плоскости сетки $E_{acc} = 85$ кВ/см.

Зависимость управляющего напряжения на зазоре сетка-катод от времени выражается формулой

$$Ug(t) = U_0 + U_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (5.1)$$

где $U_0 = -2.1$ кВ – постоянное напряжение смещения на катодно-сеточном узле, $U_1 = 2$ кВ и $\varphi_1 = 60^\circ$ – амплитуда и сдвиг фазы дополнительного ВЧ напряжения смещения на основной частоте, $\omega t = 2\pi f t$ – фаза ускоряющего поля. Расчеты проводились в диапазоне фаз ускоряющего поля от 0° до 140° при максимальном числе фазовых слоев частиц $N_\varphi = 140$.

Трехмерная модель катодно-сеточного узла (рис. 5.6) была разработана для описания инжекции пучка в ускоритель. В ней учитывается наличие семи продольных щелей разной длины в сетке, расположенной на расстоянии 1 мм от катода (рис. 5.1). Щели ориентированы вдоль оси X . Кроме того, учитывается сферическая форма катода и сетки.

Динамические параметры электронного потока с отдельной ячейки сетки, полученные с помощью двумерных расчетов на расстоянии 1 мм от сетки, использовались в качестве стартовых параметров в 3D расчетах. Каждая щель сетки разбивалась поперек на N_u равноудаленных слоев. В

каждом слое задавался ток и поперечные скорости электронов, соответствующие двумерным расчетам.

Для описания параметров пучка вдоль щелей, щели были разбиты на одинаковые микроячейки. Максимальное число микроячеек N_x задавалось для центральной (самой длинной) щели. Число микроячеек для остальных щелей определялось из условия, чтобы центральная точка крайних микроячеек не выходила за пределы катода.

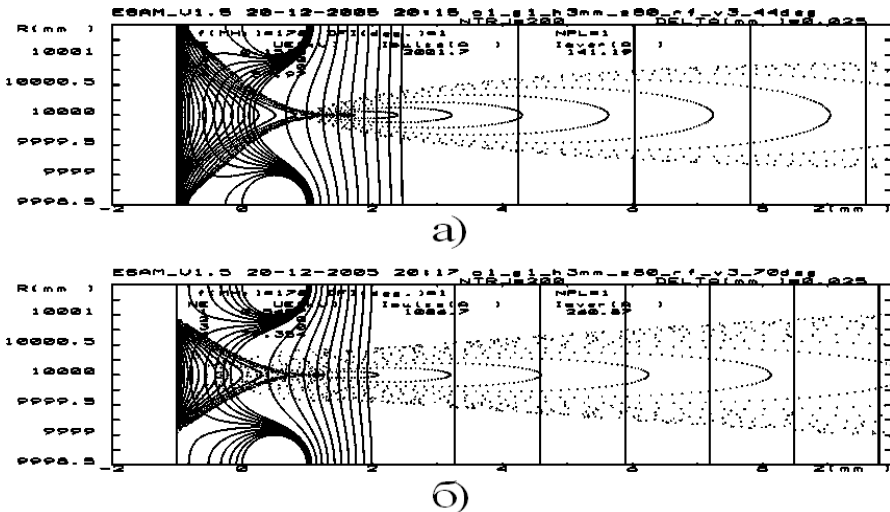


Рис. 5.5. Результаты моделирования в реальном времени отдельной ячейки катодно-сеточного узла: а) максимальный катодный ток при фазе ускоряющего поля 44° ; б) половина максимального катодного тока при фазе 70° (линии представляют эквипотенциалы, точки – фазовые слои частиц).

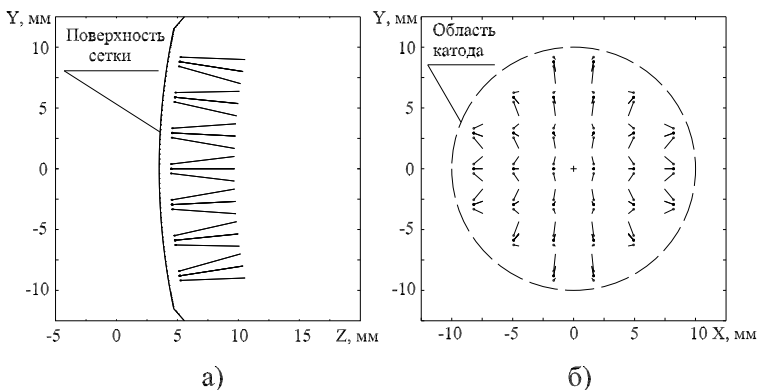


Рис.5.6. Трехмерная модель катодно-сеточного узла (показаны точки старта и направления скоростей частиц) при $N_x = 6$ и $N_y = 3$: YZ проекция; б) XY проекция.

5.3. Моделирование динамики пучка в ускорителе

Расчет динамики микрочастиц в ускорителе начинается на расстоянии 1 мм за сеткой. Пролетный эффект в катодно-сеточном узле приводит к задержке вылета электронов и изменению формы микроимпульса тока.

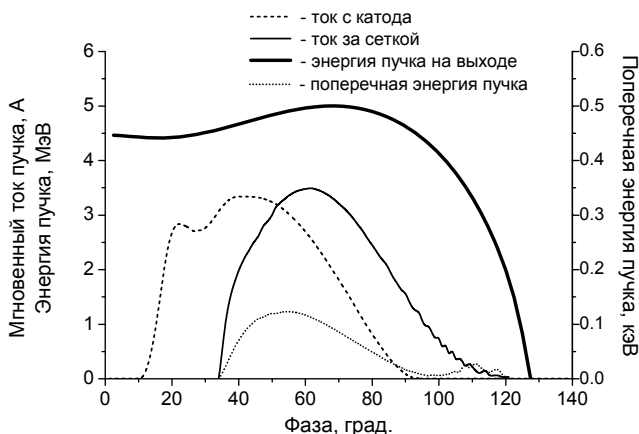


Рис. 5.7. Зависимости тока микроимпульса и выходных параметров пучка от фазы влета в первый ускоряющий зазор.

Расчет формы микроимпульса тока, стартующего за сеткой совместно с расчетом зависимости формы микроимпульса тока на катоде от времени и с учетом времяпролетных эффектов проводился с помощью программы ExtraSAM. На рисунке 5.7 пунктирной и непрерывной тонкими линиями показаны результаты расчета формы микроимпульса тока соответственно на катоде и на расстоянии 1 мм за сеткой. Набег фазы ускоряющего поля, соответствующий времени пролета электронами зазора катод-сетка, составляет $\sim 17^\circ$.

Трехмерное моделирование динамики пучка было проведено в длинноволновом приближении с помощью модифицированной программы SAM [14] с учетом формы микроимпульса тока за сеткой. Результаты расчета зависимостей энергии пучка (жирная непрерывная линия) и его эффективной поперечной энергии (тонкая точечная линия) на выходе ускорителя от фазы влета в первый ускоряющий зазор структуры также представлены на рис. 5.7. Максимум энергии электронов на выходе из ускоряющей структуры сдвинут примерно на 25° в сторону меньших фаз относительно максимума ускоряющего поля в первом зазоре. Вместе с времяпролетным эффектом в зазоре сетка-катод это приводит к необходимости подачи дополнительного напряжения первой гармоники на зазор сетка-катод для сдвига фазы микроимпульса тока в приемлемый диапазон фаз для сужения энергетического спектра пучка.

Для сравнения, на рис.5.8 показаны расчетные спектры электронов на выходе ускорителя при постоянном напряжении смещения на катоде и при подаче дополнительно ВЧ напряжения первой или второй гармоники. Спектры приведены в более информативном виде парциальных мощностей, нормированных на полную мощность пучка. Приведенная на рис.5.8 парциальная мощность пучка P_{part} определяется по формуле

$$P_{part}(W) = \int_0^W \frac{\partial I}{\partial E} E dE, \quad (5.2)$$

где $\partial I / \partial E$ – спектральная плотность тока электронного пучка, E – энергия электронов, W – диапазон энергий электронов, в котором определяется парциальная мощность пучка, а $P_{tot} = P_{part}(W_{max})$ – его полная мощность.

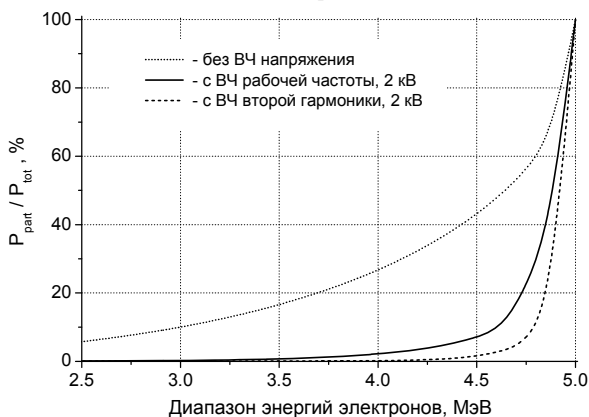


Рис. 5.8. Расчетные спектры электронов в ускорителе без подачи и с подачей дополнительного ВЧ напряжения рабочей частоты или её второй гармоники амплитудой 2 кВ.

Экспериментальная проверка эффекта сужения энергетического спектра электронов при подаче дополнительного напряжения на зазор сетка-катод электронной пушки проведена на действующем одноззорном ускорителе ИЛУ-10 и описана ниже в главе 6.

Расчетное значение средней выходной мощности пучка с параметрами, приведенными на рис. 5.7 равно 305 кВт при коэффициенте заполнения 14%. Для пучков такой большой мощности становится актуальной проблема проводки пучка без потерь. Для этого необходимо учитывать влияние пространственного заряда на поперечную динамику электронов, особенно на начальной стадии ускорения. Эффективное поперечное поле пространственного заряда для каждой макрочастицы может быть найдено по формуле

$$E_r^{(q)} = \frac{Z_0 \cdot J(t) \cdot r_0^2}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \beta \cdot \gamma^2}, \quad (5.3)$$

где $Z_0 \approx 120 \cdot \pi$ (Ом) – волновое сопротивление вакуума; $J(t)$ – динамическое значение средней плотности тока эмиссии для макрочастицы, вылетающей в момент времени t , рассчитанное с помощью программы ExtraSAM; r_0 – стартовый радиус макрочастицы; r , β и γ есть текущие значения радиуса макрочастицы, относительной скорости и релятивистского фактора.

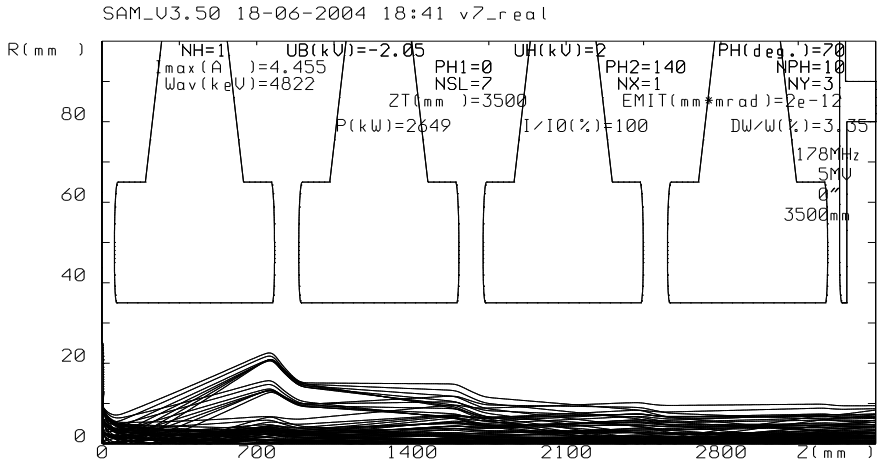


Рис. 5.9. Траектории электронов в ускорителе.

На рисунке 5.9 представлен характерный вид траекторий электронов в ускорителе ($N_x = 1$, $N_y = 3$, $N_\varphi = 10$). Как видно из рисунка, пучок, в основном, состоит из центрального ядра, сформированного стартовавшими из центров щелей сетки электронами, которые движутся перпендикулярно катоду. Также у пучка имеется заметное гало, сформированное электронами, стартовавшими с краев щелей. Эти электроны движутся под некоторым углом к нормали. Данные результаты, полученные после оптимизации радиуса кривизны сферы катодно-сеточного узла и апертуры ускорителя, показали возможность проведения пучка через ускоритель с апертурой 70 мм без использования дополнительных фокусирующих элементов.

На рисунке 5.10 показаны расчетные профили ($N_x = 30$, $N_y = 19$, $\varphi = 70$) средней плотности тока пучка в микроимпульсе на входе второго ускоряющего зазора (а), в промежутке между третьим и четвертым зазорами (б), на выходе ускорителя (в) и на расстоянии 1,5 м от выхода ускорителя (г).

Профиль плотности тока пучка на входе во второй ускоряющий зазор имеет эллиптическую форму (рис. 5.10а) вследствие того, что инжектированные электроны имеют разброс скоростей только поперек

направления щелей. Во время ускорения ВЧ фокусировка приводит к постепенному исчезновению эллиптичности в промежутке между третьим и четвертым ускоряющими зазорами (Рис. 5.10б) и на выходе ускорителя (Рис. 5.10в). Однако, из-за перефокусировки периферийных частиц пучка, профиль пучка снова принимает слегка эллиптическую форму на расстоянии 1,5 м от выхода ускорителя (рис. 5.10г). Борьбу с этим эффектом можно, например, с помощью дополнительной магнитной фокусировки пучка вблизи мишени.

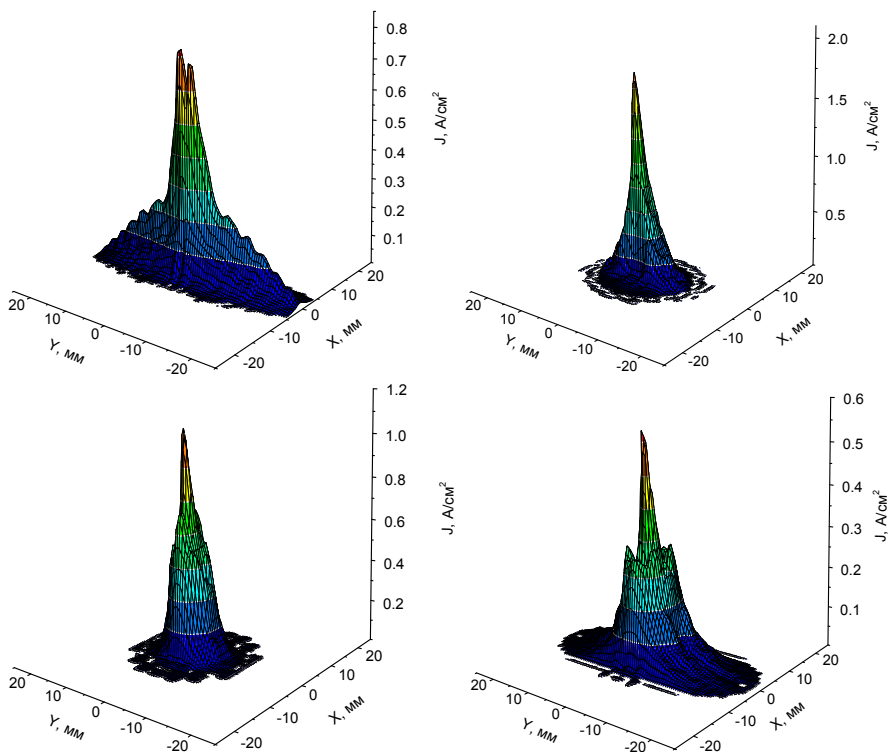


Рис. 5.10. Профили средней плотности тока пучка на различных стадиях ускорения.

Полученные результаты подтверждают возможность достижения требуемого значения импульсного тока пучка и проведения мощного тока электронного пучка через ускоряющую структуру без использования магнитостатических линз.

6. Испытание триодной ВЧ-пушки на ускорителе ИЛУ-10

Для подтверждения возможности коррекции спектра электронов путем подачи дополнительного ВЧ-напряжения на зазор сетка-катод были проведены эксперименты на существующем линейном ускорителе ИЛУ-10 (рабочая частота 116 МГц, средняя мощность пучка 50 кВт).

6.1. Численные исследования спектра пучка в ИЛУ-10

Триодная ВЧ пушка в ИЛУ-10 включает в себя два функционально разных зазора: зазор сетка-катод, в котором происходит формирование микроимпульса тока, и ускоряющий зазор ускорителя, в котором электроны набирают основную энергию. Для расчета спектра пучка необходимо знать зависимости мгновенного значения тока на выходе зазора сетка-катод (микроимпульса тока) и выходной энергии электронов от их фазы влета в ускоряющий зазор ускорителя.

Полная энергия, набираемая электронами в ускоряющем зазоре, слабо зависит от начальной энергии электронов и определяется в основном их фазой влета в ускоряющий зазор. На рис. 6.1 приведена расчетная зависимость выходной энергии электронов от фазы влета в ускоряющий зазор (непрерывная жирная кривая) при амплитуде ускоряющего напряжения 5 МВ и начальной энергии электронов 3 кэВ. Расчет проводился модифицированной программой SAM в длинноволновом приближении. Видно, что максимальная выходная энергия электронов составляет 4.88 МэВ и достигается при оптимальной фазе влета 69° . Пролетный угол электронов в ускоряющем зазоре при амплитуде ускоряющего напряжения 5 МВ составляет 38° .

Пушка с заземленной сеткой работает в режиме С. Форма микроимпульса тока и энергия, набираемая электронами на первом зазоре, существенно зависят не только от потенциала на катоде, но и от ускоряющего поля в основном зазоре ускорителя, проникающего в зазор сетка-катод из-за прозрачности сетки. На рис. 6.2 приведена экспериментальная кривая зависимости импульсного тока (среднего тока пучка в течение периода ВЧ) ускорителя ИЛУ-10 от напряжения смещения сетка-катод для катода диаметром 16 мм. Сложная форма ячеек сетки и островковый эффект приводят к тому, что при заданном напряжении на ускоряющем резонаторе 5 МВ эффективная прозрачность сетки (наклон кривой на рис. 6.2) зависит от напряжения смещения на катоде.

Проведенные расчеты показывают, что при постоянном напряжении смещения на сетке максимум тока пучка в ускорителе ИЛУ-10 сдвинут в сторону больших фаз относительно оптимальной фазы ускорения, и значительная часть ускоренных электронов пучка имеют энергию, существенно меньшую максимальной (тонкая непрерывная кривая). Для улучшения спектра пучка необходимо сдвинуть максимум тока как минимум на 25° в сторону меньших фаз. Также желательно сузить фазовую

протяженность микроимпульса тока. Это можно сделать путем подачи дополнительного высокочастотного напряжения на зазор сетка-катод и подбора оптимальных значений его амплитуды и фазы.

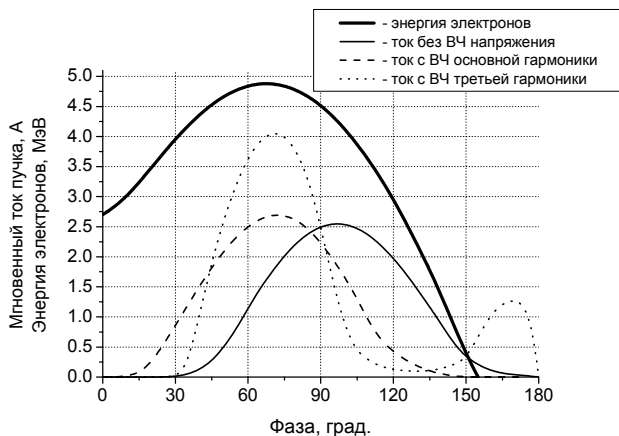


Рис. 6.1. Расчетные зависимости мгновенного тока пучка на входе в ускоряющий зазор и выходной энергии электронов от фазы влета в ускоряющий зазор.

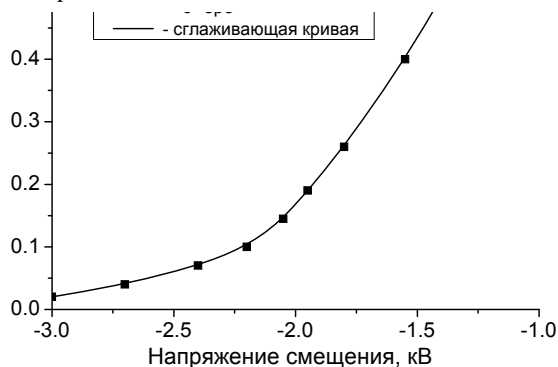


Рис. 6.2. Экспериментальная зависимость импульсного тока от напряжения смещения сетка-катод в ускорителе ИЛУ-10 для катода диаметром 16 мм (при зазоре сетка-катод 1,8 мм).

На рис. 6.1 представлены микроимпульсы тока при подаче дополнительного высокочастотного напряжения рабочей частоты ускоряющего резонатора (пунктирная кривая) или ее третьей гармоникой (точечная кривая). В этих расчетах постоянное напряжение смещения и импульсный ток пучка оставались такими же, как при работе без ВЧ напряжения. Видно, что подача дополнительного ВЧ напряжения рабочей частоты позволяет сдвинуть максимум, но не дает существенного сужения фазовой длины микроимпульса

тока. При подаче ВЧ напряжения третьей гармоники заметно сужается фазовая длина основного микроимпульса тока, но появляются электроны, влетающие в ускоряющий зазор при фазе поля больше 150 градусов, часть которых может вернуться на катод.

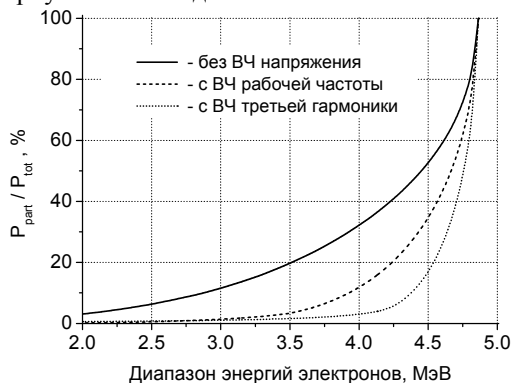


Рис. 6.3. Расчетные спектры электронов в ИЛУ-10 без подачи и с подачей дополнительного ВЧ напряжения рабочей частоты или её третьей гармоники.

На рис. 6.3 показаны расчетные спектры электронов на выходе ускорителя при постоянном напряжении смещения на катоде и при подаче дополнительно ВЧ напряжения первой или третьей гармоники, соответствующие микроимпульсам тока, показанным на рис. 3. Спектры приведены в более информативном виде парциальных мощностей, нормированных на полную мощность пучка.

6.2. Устройства подачи дополнительного ВЧ напряжения

Были сконструированы, изготовлены и испытаны на ускорителе ИЛУ-10 два варианта инжекционного узла триодной высокочастотной пушки с возможностью подачи дополнительного ВЧ напряжения на зазор сетка–катод.

В первом варианте (рис. 6.4) дополнительное высокочастотное напряжение рабочей частоты поступает из ускоряющего резонатора через петлю связи, фазовращатель и коаксиальную линию, нагруженную на согласованную нагрузку 50 Ом. КСВ в линии с учетом импеданса катодно-сеточного узла не превышает 1,35. Разделительные конденсаторы С позволяют подавать постоянное напряжение смещения на катод.

Второй вариант инжекционного узла триодной высокочастотной пушки содержит коаксиальный резонатор, настроенный на частоту третьей гармоники ускоряющего напряжения 348 МГц (рис. 6.5). Разомкнутый с обеих сторон коаксиальный резонатор 1 длиной λ укорочен с одной стороны емкостью между катодом и сеткой катодно-сеточного узла 2, с противоположной стороны – емкостью конструктивного конденсатора 3. Перемещением плунжера 4 осуществляется подстройка резонансной частоты

коаксиального резонатора. Внутренняя труба резонатора изолирована от корпуса и находится под постоянным потенциалом смещения катода. Катодно-сеточный узел вместе с резонатором размещаются в полости верхнего выступа 5 ускоряющего резонатора ИЛУ-10. Провода накала подогревателя катода вводятся в резонатор пушки через вакуумные изоляторы 6 в точке нулевого высокочастотного потенциала.

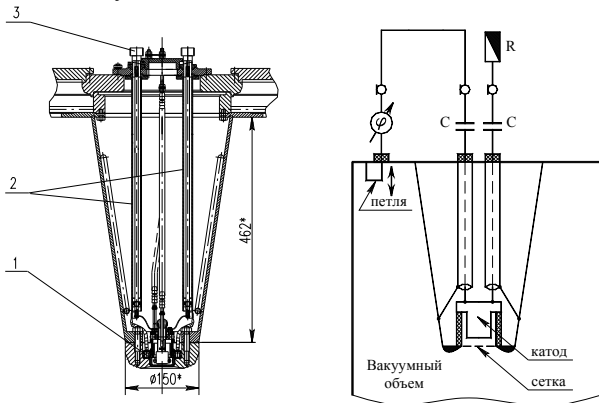


Рис. 6.4. Общий вид и эквивалентная схема инжекционного узла триодной ВЧ пушки с подачей дополнительного напряжения рабочей частоты: 1 – катодно-сеточный узел, 2 – коаксиальные линии, 3 – вакуумные коаксиальные разъемы.

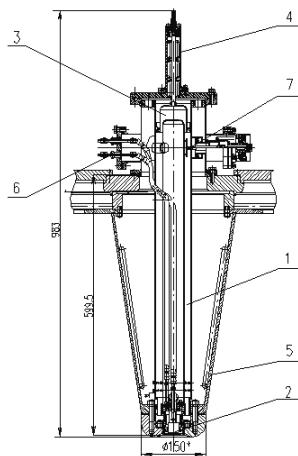


Рис.6.5 Общий вид инжекционного узла триодной ВЧ пушки с резонатором третьей гармоники: 1 – коаксиальный резонатор, 2 – катодно-сеточный узел, 3 – конструктивная емкость, 4 – механизм перемещения плунжера, 5 – верхний электрод ускоряющего зазора ускорителя, 6 – электроды подачи накала инжектора, 7 – подвижный узел связи.

Возбуждение резонатора инжекционного узла пушки осуществляется от каскада утроителя по гибкому коаксиальному кабелю через фазовращатель. Связь с резонатором емкостная и регулируется с помощью подвижного узла связи 7.

6.3. Экспериментальные результаты

Интенсивность выхода гамма-квантов определяется энергией электронов, тормозящихся на мишени. Подача дополнительного ВЧ напряжения увеличивает долю высокоэнергичных электронов, в результате чего возрастает интенсивность выхода гамма-квантов. По этому эффекту подбиралась оптимальная фаза ВЧ напряжения в зазоре сетка-катод.

На рис. 6.6 показана экспериментальная зависимость выхода тормозного излучения от фазы дополнительного высокочастотного напряжения рабочей частоты. За начальный уровень взята величина тормозного излучения при отключенном внешнем высокочастотном напряжении на электронной пушке. Так же на рисунке приведена зависимость постоянного напряжения смещения на катоде пушки при неизменной величине импульсного тока пучка. Возрастание постоянного запирающего напряжения на электронной пушке говорит в пользу правильности подбора оптимальной фазы дополнительного высокочастотного напряжения по отношению к фазе ускоряющего напряжения. Происходит возрастание вытягивающего напряжения и для сохранения прежнего значения тока с катода необходимо увеличивать запирающий потенциал на катоде пушки.

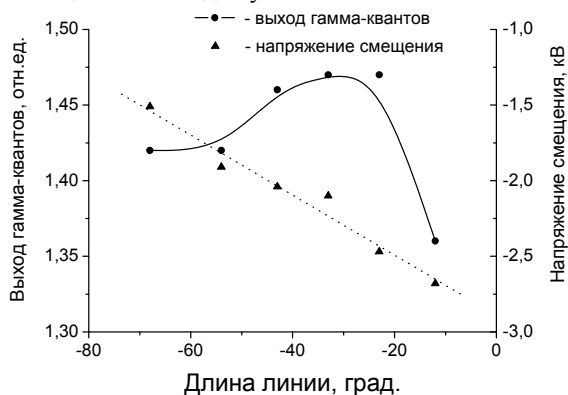


Рис. 6.6. Экспериментальная зависимость выхода тормозного излучения и напряжения смещения при величине импульсного тока 400мА от фазы дополнительного высокочастотного напряжения рабочей частоты.

Аналогичные зависимости при подаче дополнительного высокочастотного напряжения третьей гармоники представлены на рис. 6.7.

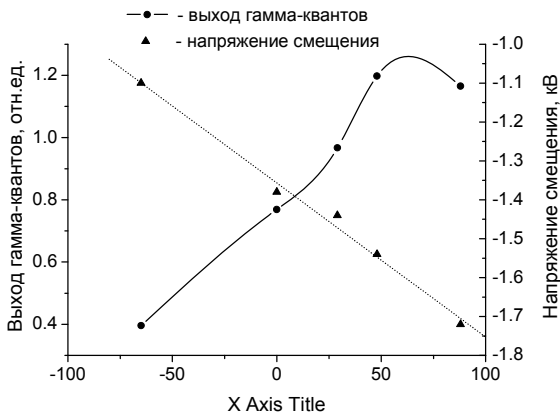


Рис. 6.7. Экспериментальная зависимость выхода тормозного излучения и напряжения смещения при величине импульсного тока 300 мА от фазы дополнительного ВЧ напряжения третьей гармоники.

Энергетические спектры снимались в точках максимального выхода гамма-квантов (по фазовым характеристикам рис. 6.6, 6.7) и были пересчитаны на импульсный ток 400 мА. Измерения спектра ускоренного пучка проводились с использованием магнитного спектрометра с неоднородным магнитным полем ($n = 0.5$), углом поворота 148 градусов и радиусом поворота 200 мм. На входе и выходе спектрометра устанавливались коллиматоры в виде таблеток из графита со щелями шириной от 1 до 3 мм. Ток пучка фиксировался на цилиндре Фарадея, установленном после спектрометра.

На рис. 6.8 представлены экспериментальные графики энергетических спектров электронов на выходе ИЛУ-10 без подачи дополнительного внешнего высокочастотного напряжения, а также с использованием первой и третьей гармоник ускоряющего напряжения.

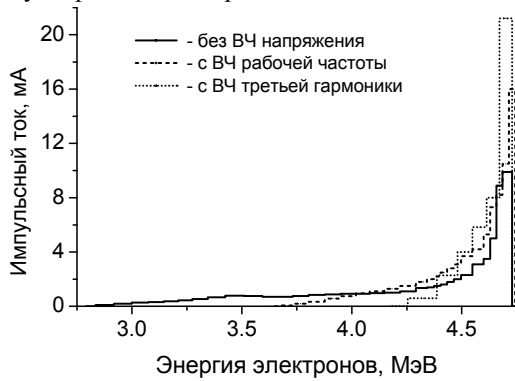


Рис. 6.8. Измеренные спектры электронного пучка на выходе ИЛУ-10.

Эксперименты показали, что при подаче дополнительного ВЧ напряжения рабочей частоты максимальное значение тока с цилиндра Фарадея магнитного спектрометра возрастает в 1,5 раза по сравнению с максимальным значением тока без подачи дополнительного напряжения. При подаче дополнительного напряжения третьей гармоники максимальное значение тока с цилиндра Фарадея возрастает в 2 раза.

В обоих случаях существенно снижается низкоэнергетическая часть спектра пучка по сравнению с инжекцией без подачи дополнительного внешнего высокочастотного напряжения. Мощность, потребляемая высокочастотным генератором от модулятора, возрастает на 12÷15%.

На рис. 6.9 результаты измерений спектра пучка на выходе ИЛУ-10 представлены в виде относительных парциальных мощностей.

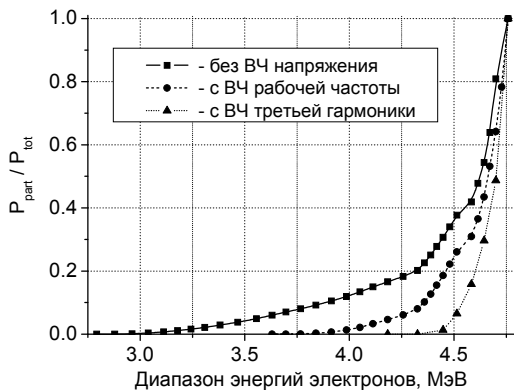


Рис. 6.9. Измеренные спектры электронного пучка на выходе ИЛУ-10 в виде относительных парциальных мощностей.

6.4. Выводы

Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают улучшение энергетического спектра электронов в ускорителе ИЛУ-10 при подаче дополнительного напряжения рабочей частоты или её третьей гармоники.

Измерения показывают, что без дополнительного ВЧ в пределах 5% энергетического разброса находится 62% мощности пучка. С дополнительной ВЧ рабочей частоты в пределах этого разброса находится уже 74% мощности пучка. И, наконец, с дополнительной ВЧ третьей гармоники в 5% энергетического разброса находится 93% мощности пучка.

Расчеты и эксперименты показывают, что без дополнительного ВЧ существуют обратные электроны. Приосевые обратные электроны возвращаются на катодно-сеточный узел, а периферийные – на верхний выступ ускоряющего резонатора ИЛУ-10. Расчетная максимальная энергия обратных электронов может достигать 2,5 МэВ.

Дополнительное ВЧ напряжение рабочей частоты на зазоре сетка-катод, оптимизированное по амплитуде и фазе, приводит к уменьшению энергетического разброса электронов на выходе ускорителя и предотвращают появление обратных электронов.

Дополнительное напряжение ВЧ третьей гармоники приводит к еще большему сужению энергетического спектра электронов, но в то же время, согласно расчетам, не может полностью предотвратить появление обратных электронов.

Полученные результаты демонстрируют эффективность внутренней инжекции с применением дополнительного ВЧ и такая схема инжекции может быть применена при создании ускорителя.

7. Заключение

Для подтверждения концептуальных решений при создании промышленного 300кВт линейного ускорителя электронов на энергию 5 МэВ были проведены численные и экспериментальные исследования:

- а. На ускорителе ILU-10 экспериментально показана эффективность триодной ВЧ-пушки. Получена фазовая протяженность микроимпульсов тока пучка $\approx 60^\circ$ при оптимальной фазе инжекции, обеспечивающие получение максимального выхода гамма-квантов при заданной мощности пучка. Основываясь на этих экспериментальных результатах и численных расчетах, для ускорителя разработана конструкция триодной ВЧ-пушки, которая позволит получить микроимпульс тока с запасом по амплитуде 1.3 при фазовой протяженности сгустка $\approx 60^\circ$.
- б. Численные исследования показали, что поперечный эмиттанс пучка ускорителя в основном определяется угловым разбросом, полученным электронами при рассеянии на микролинзах, образованных ячейками управляющей сетки. Апертура ускорителя выбрана такой, чтобы пропустить без заметных потерь сгустки электронов, инжектируемые в первый зазор ускорителя в максимуме ускоряющего напряжения. При транспортировке пучка в канале ускорителя не используются никакие дополнительные фокусирующие устройства. Расчетный запас по акцептансу канала ускорителя составляет 20%.
- в. Разработана высокоэффективная система охлаждения ускоряющей структуры, способная снять ~ 200 кВт выделяемого в ней тепла.
- г. Расчетная максимальная напряженность электрического поля на поверхности ускоряющих ячеек структуры составляет 380 кВ/см, что в 1.6 раза меньше чем в ускорителе ILU-10.
- д. В институте разработан ввод мощности 180МГц. Изготовлено и испытано несколько десятков этих вводов для резонаторов микротрона-рекуператора. При испытаниях они выдерживают 1.5 МВт импульсной

мощности и более 150 кВт средней. На основе этого опыта разрабатывается ввод для ускорителя импульсной мощностью >3 МВт и средней ~50 кВт. Модернизируется стенд для испытаний вводов мощности.

- e. Разработка генератора на основе диакрода ТН628 может обеспечить запас по средней мощности примерно в 1.5 раза. При его испытаниях на стенде фирмы “Thales” на более высокой частоте (200 МГц) было получено 3 МВт импульсной мощности и 600 кВт средней.

Проведенные исследования показывают возможность создания высокоэффективного промышленного электронного ускорителя на энергию 5 МэВ, со средней мощностью в пучке 300 кВт и высокими эксплуатационными характеристиками.

Литература

- [1] Rhodotron TT300. Product Description. Ion Beam Applications, Belgium, 1997.
- [2] G. Loda, Private communication.
- [3] В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.Г. Ческидов и др. Ускоритель электронов 5 МэВ 50 кВт с тормозной мишенью. Вопросы атомной науки и техники, 2004, №1, с.21.
- [4] В.Л. Ауслендер, В.В. Безуглов, А.А. Брызгин и др. Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-8, Препринт ИЯФ 2006-6, Новосибирск, 2006.
- [5] J. Lyles, C. Fredrichs, M. Lynch. New High Power 200MHz RF System for the LANSCE Drift YUbe Linac, Proc. XIX International Linac Conference, Chicago, 1998, p.231-233.
- [6] D. Myakishev, V. Yakovlev. An Interactive Code SUPERLANS for Evaluation of RF-cavities and Accelerating Structure, in IEEE Particle Accelerator Conf. Rec., 1991, vol.5, p.3002-3004.
- [7] В.Ф. Викулов, В.Е. Калужный. Влияние погрешностей изготовления на характеристики ускоряющих структур со стоячей волной. ЖТФ, 1980, том 50, вып.4.
- [8] Справочник по диафрагмированным волноводам. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [9] С.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич, Б.И. Гришианов и др. Запуск позитрон-электронного источника для ВЭПП-4. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Т.1, М.: 1979, с.128.
- [10] М.М. Карлинер, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко и др., Влияние электромагнитных полей отверстий связи на движение частиц в

линейном ускорителе электронов. Вопросы атомной науки и техники, 1984, вып.1(18), с.30

- [11] *V.L. Auslender, I.G. Makarov, V.V. Tarnetsky, M.A. Tiunov.* Numerical study of coupling slot effects on beam dynamics in industrial accelerator prototype, Proceedings of PAC-05 Particle Accelerator Conference Knoxville, Tennessee USA, May 16-20 2005, p.1622-1624.
- [12] *М.А.Тиунов, Б.М.Фомель, В.П.Яковлев.* SAM - интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-159, 1989.
- [13] *M.A.Tiunov et al.* Modeling of internal injection and beam dynamics for high power RF accelerator. - Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, USA, 2005, p.1419-1421.
- [14] *M.A.Tiunov et al.* Precision modeling of the internal injection and beam dynamics for a high-power RF accelerator, NIM A, 558 (2006), p.77-88.

*В.Л. Ауслендер, И.Г. Макаров, Г.И. Кузнецов, Г.Н. Острейко,
А.Д. Панфилов, Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий,
М.А. Тиунов, К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

**Численные и экспериментальные исследования
возможности создания промышленного
300 кВт линейного ускорителя электронов на энергию 5 МэВ**

*V.L. Auslender, I.G. Makarov, G.I. Kuznetsov, G.N. Ostreiko,
A.D. Panfilov, G.V. Serdobintsev, V.V. Tarnetsky,
M.A. Tiunov, K.N. Chernov, V.G. Cheskidov*

**Numerical and experimental investigations
for 5 MeV, 300 kW linear electron accelerator development**

ИЯФ 2008-8

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 9.04. 2008 г.

Сдано в набор 10.04. 2008 г.

Подписано в печать 11.04. 2008 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 2.7 печ.л., 2.2 уч.-изд.л.

Тираж 115 экз. Бесплатно. Заказ № 8

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11