

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов,
И.В. Горнаков, Е.Н. Кокин, Г.И. Кузнецов,
А.Н. Лукин, И.Г. Макаров, С.А. Максимов,
Н.В. Матяш, Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов,
Г.В. Сердобинцев, А.В. Сидоров, В.М. Радченко,
Н.Д. Ромашко, В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов,
В.О. Ткаченко, Б.Л. Факторович, К.Н. Чернов,
В.Г. Ческидов

РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЯ ИЛУ-14
И ИСПЫТАНИЕ ЕГО ПРОТОТИПА

ИЯФ 2010-2

НОВОСИБИРСК
2010

Разработка ускорителя ИЛУ-14 и испытание его прототипа

*В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов, И.В. Горнаков,
Е.Н. Кокин, Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин, И.Г. Макаров,
С.А. Максимов, Н.В. Матяш, Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов,
Г.В. Сердобинцев, А.В. Сидоров, В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко,
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, В.О. Ткаченко, Б.Л. Факторович,
К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

Институт ядерной физики им.Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

В ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера разработан новый мощный (до 100 кВт) промышленный линейный ускоритель электронов ИЛУ-14 на энергию 7.5 ÷ 10 МэВ. Рабочая частота ускорителя 176 МГц, полный КПД 26%. Ускоритель имеет модульную структуру, позволяющую в определенных пределах менять энергию электронов и мощность в пучке путем изменения модульной комплектации. В препринте представлены численные и экспериментальные исследования систем ускорителя. Особое внимание уделено ускоряющей структуре, способу инжекции и динамике пучка в ускорителе. Изготовлен и успешно прошел испытания 5 МэВ прототип этого ускорителя. В экспериментах получены расчетные средний ток пучка 600 мА, импульсная мощность пучка 2.5 МВт и электронный КПД ускоряющей структуры 68%. Благодаря подаче дополнительного ВЧ напряжения на зазор сетка-катод пушки достигнуто токопрохождение электронного пучка 96% и получен малый энергетический разброс пучка. Прототип ускорителя ИЛУ-14 может быть использован как самостоятельный ускоритель с мощностью в пучке 50 кВт.

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

Development of ILU-14 accelerator and TEST of its prototype

*V.L. Auslender, A.A. Bryazgin, K.N. Chernov, V.G. Cheskidov,
B.L. Faktorovitch, V.A. Gorbunov, I.V. Gornakov, E.N. Kokin,
G.I. Kuznetsov, A.N. Lukin, I.G. Makarov, S.A. Maximov,
N.V. Matyash, G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, G.V. Serdobintsev,
A.V. Sidorov, V.M. Radchenko, N.D. Romashko, V.V. Tarnetsky,
M.A. Tiunov, V.O. Tkachenko*

Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

New high-power (up to 100 kW) industrial electron accelerator ILU-14 with modular structure for energy of 7.5 – 10 MeV has been developed in Budker INP SB RAS. The accelerator operates at 176 MHz with the total efficiency of 26%. Electron energy and beam power of the accelerator may be changed by varying its part kitting because of its modular structure. The preprint presents results of numerical and experimental investigations of the accelerator systems including accelerating structure, injection unit, and beam dynamics. 5 MeV accelerator prototype has been manufactured and successfully tested; the following designed parameters have been obtained: beam average current of 600 mA, beam pulsed power of 2.5 MW, and structure electron efficiency of 68 %. An additional RF voltage applied to the gun grid-cathode gap provided the beam current passing of 96 % and minor beam energy spread. In case of need, the prototype may be used as a 50 kW accelerator.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее 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, дезинфекции медицинских отходов и т. д. Для этих целей необходимы ускорители с энергией пучка 7.5 – 10 МэВ и средней мощностью в пучке 100 кВт и более.

Важнейшим параметром промышленных ускорителей является эффективность преобразования энергии источника ВЧ мощности в энергию заряженных частиц (КПД). 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.

1. Родотрон. Высокий КПД в нем достигается многократным прохождением частицами одного резонатора. Примером такого ускорителя является "Rhodotron ТТ300" [1]. Пучок проходит резонатор 10 раз и на выходе имеет энергию 10 МэВ и мощность 220 кВт. КПД ускоряющей структуры $\approx 73\%$, рабочая частота 107.5 МГц.

2. Импульсный линейный ускоритель. Высокий КПД обеспечивается значительной нагрузкой ускоряющих структур импульсным током ускоряемых частиц. Одним из таких ускорителей является ускоритель SureBeam Corporation, работающий на частоте 1.3 ГГц, мощность пучка 120 кВт, энергия электронов 5 МэВ, КПД 70% [2].

В ИЯФ СОРАН создана серия ускорителей типа ИЛУ [3, 4, 5] на энергию до 5 МэВ и мощностью в пучке до 50 кВт. Для расширения спектра применения ускорителей этого типа разработан новый мощный (до 100 кВт) промышленный ускоритель электронов на энергию 7.5 – 10 МэВ. Модель получила название ИЛУ-14 и может быть использована как в режиме облучения электронным пучком, так и в гамма-моде. Ускоритель унаследовал основные черты серии ИЛУ, такие как внутренний тип инжекции и использование автогенератора в качестве источника ВЧ мощности, а также содержит ряд особенностей. На базе ИЛУ-14 планируется создание линейки простых и надежных в эксплуатации ВЧ ускорителей, способных оказать конкуренцию существующим промышленным ускорителям в данном диапазоне энергий.

2. КОНЦЕПЦИЯ и БЛОК-СХЕМА ИЛУ-14

На рисунке 1 представлена блок-схема мощного промышленного ускорителя ИЛУ-14. Основные элементы ускорителя: ускоряющая структура, триодная электронная ВЧ пушка, двухкаскадный автогенератор, фидерная система, ВЧ вводы мощности, модуляторы, система развертки и конвертер (в случае работы ускорителя в гамма-моде).

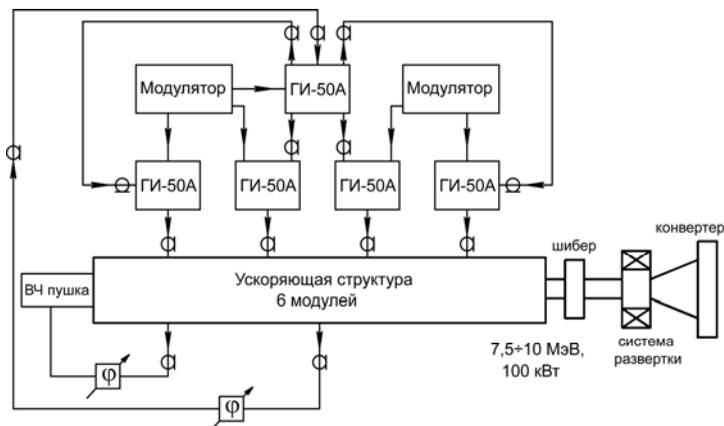


Рис. 1. Блок-схема ИЛУ-14.

По сравнению с известными мощными импульсными линейными ускорителями в ИЛУ-14 реализован ряд особенностей.

Первой особенностью ускорителя является то, что в нем для ускорения электронов используется низкочастотная многорезонансная структура на стоячей волне с резонаторами связи на оси. Структура собирается из отдельных модулей с применением индиевых уплотнений. Модуль содержит полный резонатор связи и два половинных ускоряющих резонатора (см. рис. 2). Ускоряющая структура на энергию электронов до 10 МэВ содержит 6 таких модулей. Структура возбуждается автогенератором на основе мощных высокоэффективных электровакуумных приборов – триодов ГИ-50А, обеспечивающих ускорителю конкурентоспособный промышленный КПД.



Рис. 2. Модуль ускоряющей структуры.

Второй особенностью ускорителя на низкой частоте является использование в качестве источника электронов триодной ВЧ-пушки со специально разработанной сеткой с высокой проницаемостью. Пушка помещена непосредственно в первый ускоряющий зазор. Узкий энергетический спектр мощного электронного пучка, необходимый для проведения пучка через структуру с малыми потерями и эффективного преобразования его мощности в гамма-излучение, обеспечивается благодаря подаче дополнительного ВЧ напряжения на зазор сетка-катод этой пушки.

Третьей особенностью является применение двухкаскадного генератора с цепью обратной связи, замкнутой через ускоряющую структуру. При этом отпадает необходимость в системе стабилизации частоты ускоряющей структуры или генератора. Как результат, существенно упрощаются как генератор, так и система управления ускорителем.

Четвертой особенностью является модульная конструкция ускорителя (отдельные модули собираются из узлов, уже проверенных и выпускаемых экспериментальным производством ИЯФ).

Принятая концепция позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить стоимость всего ускорителя, а также повысить его надежность и уменьшить эксплуатационные расходы.

3. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Выбор ускоряющей структуры определяется особенностями конкретной установки и во многом влияет на физические и эксплуатационные параметры ускорителя. Создание промышленного ускорителя большой мощности предполагает 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.

Реализация принятой концепции ускорителя, в которой предусматривается внутренняя инжекция электронов и проведение их в тракте ускорителя без применения магнитостатических линз, оказало значительное влияние на оптимизацию не только профиля ускоряющих ячеек, но и характерных размеров ускорителя в целом. Общий вид ускоряющей структуры приведен на рисунке 3. Ускоряющая структура

состоит из пяти полных и двух половинных (концевых) ускоряющих резонаторов и шести резонаторов связи.

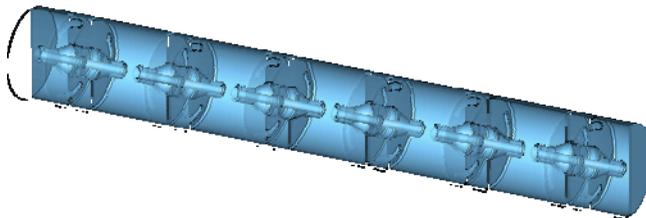


Рис. 3. Общий вид ускоряющей структуры ИЛУ-14.

Структура является бипериодической с резонаторами связи на оси и работает на частоте 176 МГц в режиме стоячей волны на моде $\pi/2$. Связь между резонаторами осуществляется по магнитному полю посредством щелей связи (по две в каждой стенке резонатора). Для предотвращения связи через ячейку, щели в противоположных стенках резонаторов связи повернуты друг относительно друга на 90° .

Геометрия резонаторов ускоряющей структуры была оптимизирована с помощью программы SuperLANS [6]. На рисунке 4 показан профиль полного ускоряющего резонатора. Он представляет собой полуволновый коаксиальный резонатор. Внешний диаметр 700 мм, ускоряющий зазор 110 мм. Расчетные электродинамические параметры ускоряющей структуры приведены в таблице 1.

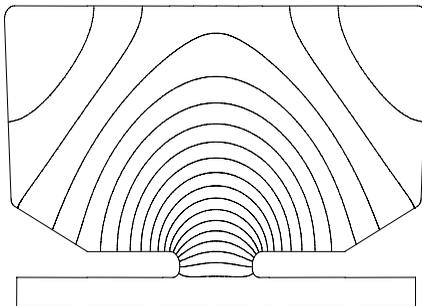


Рис. 4. Оптимизированный профиль полного ускоряющего резонатора.

Таблица 1

Рабочая частота, МГц	176
Добротность	22000
Характеристическое сопротивление, Ω	1240
Шунтовое сопротивление, М Ω	27.3
Пролетный фактор	0.986
Коэффициент связи	0.078

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. 5 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.

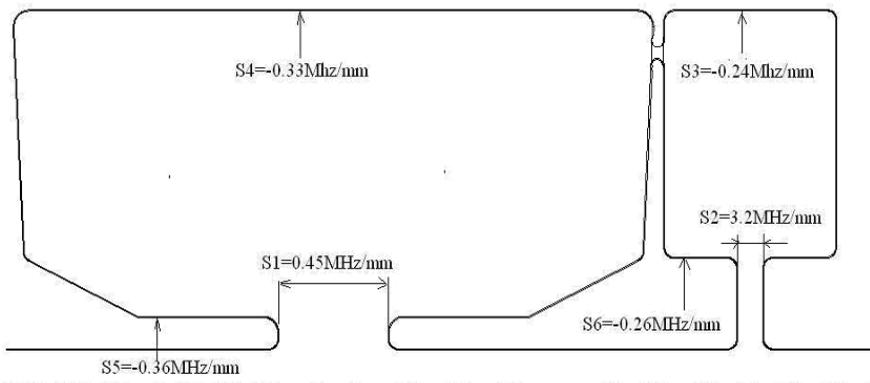


Рис. 5. Степень влияния изменения размеров на частоту: $S1, S2$ – влияние зазоров; $S3 - S6$ – влияние диаметров.

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. 6 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]:

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

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

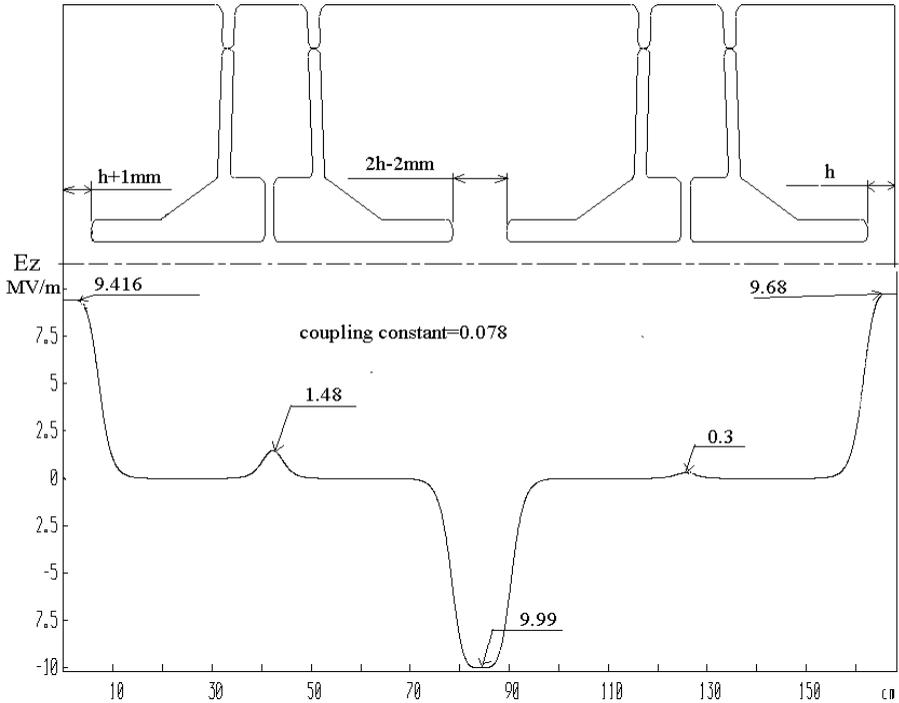


Рис. 6. Флуктуации полей E_z в ячейках при отлчии частот ускоряющих ячеек: половинной $\Delta f/f = +5 \cdot 10^{-3}$; полной $\Delta f/f = -5 \cdot 10^{-3}$.

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]:

$$k \cong -\frac{Z_h}{Z_0} \cdot N \cdot \frac{l_h^3}{6} \cdot H_a \cdot H_c, \quad (2)$$

$$f_{a,c} \cong f_{0a,0c} \cdot \left(1 - k \cdot \frac{H_{a,c}}{H_{c,a}}\right)^{-0.5}, \quad (3)$$

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

Приближенные аналитические соотношения (2, 3) полезны для определения необходимой точности изготовления щели. На рис. 7 приведены

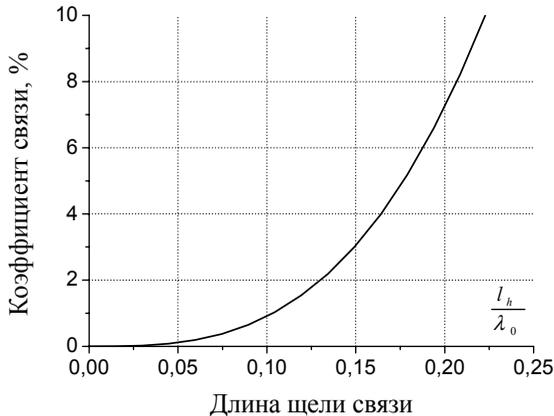


Рис. 7. Зависимость коэффициента связи от азимутальной протяженности щели.

результаты расчетов коэффициента связи. Девияция собственных частот ячеек в зависимости от азимутальной протяженности щели показана на рис. 8. Используя соотношения (1, 2, 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%.

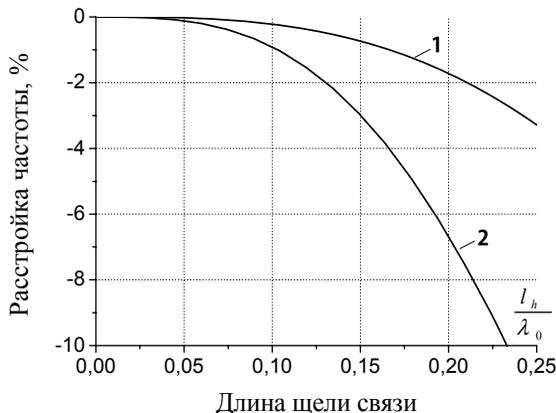


Рис. 8. Зависимость изменения собственных частот ячеек от азимутальной протяженности щели: 1 – ускоряющий резонатор, 2 – резонатор связи.

4. ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ И ДИНАМИКИ ПУЧКА

В ускорителях серии ИЛУ, используется внутренняя инжекция электронов. Катодно-сеточный узел устанавливается на оси резонатора непосредственно на входе в ускоряющий зазор. Требуемый ток эмиссии сгустков электронов обеспечивается за счет проникновения в зазор сетка-катод электрического ВЧ поля из ускоряющего зазора резонатора. Амплитуда микроимпульса тока и его фазовая протяженность регулируются путем подачи постоянного запирающего напряжения смещения на зазор сетка-катод (работа в режиме С). Для уменьшения потерь и сужения спектра пучка предлагается 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. Экспериментально такой режим был опробован на ускорителе ИЛУ-10. Получен ток пучка 500 мА и зарегистрировано существенное снижение низко-энергетичной части спектра пучка [9].

В ускоряющей структуре ускорителя ИЛУ-14 поле в зазоре в 2 раза меньше, чем в однорезонаторном ускорителе ИЛУ-10. Однако, импульсный

ток пучка должен быть сравним с током в ИЛУ-10. Для получения необходимого тока пучка требуется увеличить прозрачность сетки. Получить необходимую прозрачность путем уменьшения зазора сетка-катод на стандартной крупноячейстой 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. Для увеличения прозрачности сетки в ускорителе ИЛУ-14 предлагается использовать катодно-сеточный узел со щелевой сеткой, ячейки которой являются щелями разной длины, но одинаковой ширины между эквидистантно натянутыми параллельными проволочками (рис. 9).

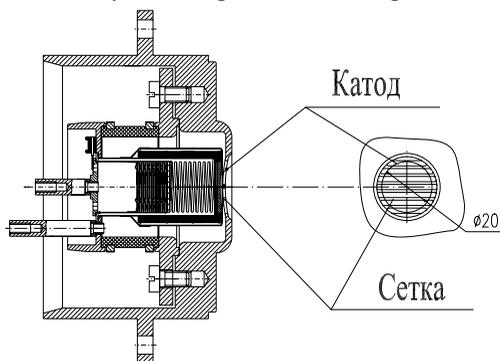


Рис. 9. Общий вид катодно-сеточного узла со щелевой сеткой.

Кроме того, что щелевая сетка обладает большей прозрачностью по сравнению с ячейстой сеткой, ее электронно-оптические свойства могут быть с хорошей точностью численно промоделированы в двумерном приближении. На рис.10 представлена двумерная модель катодно-сеточного узла. Ее основные геометрические параметры: зазор катод-сетка d , шаг сетки h , диаметр проволочек D .

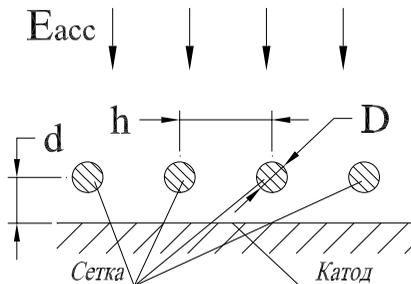


Рис. 10. Двумерная модель катодно-сеточного узла.

В статическом приближении с помощью программы SAM [10] проводился поиск оптимальных параметров ячейки для получения максимальной прозрачности сетки при минимальном эмиттансе пучка. В результате были получены следующие значения: $d = 1.5$ мм, $h = 3$ мм, $D = 1$ мм.

Для проверки статических вольтамперных характеристик был изготовлен и испытан триод со стандартным катодным узлом из LaB_6 диаметром 20 мм, анодом из графита и сеткой с вышеприведенными параметрами. Расчетные и экспериментальные зависимости средней плотности тока с катода от напряжения смещения приведены на рис. 11. Совпадение хорошее.

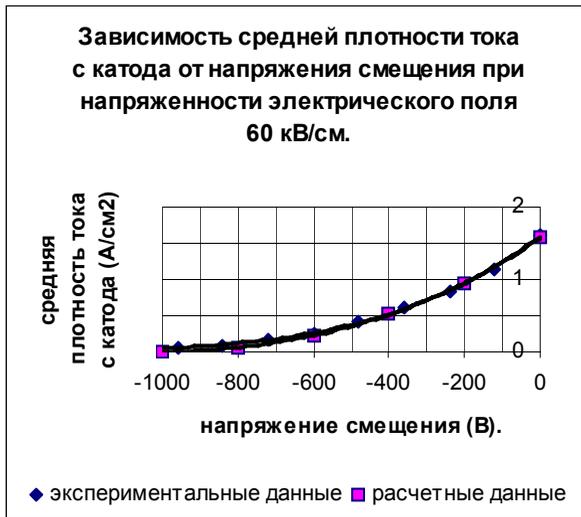


Рис. 11. Зависимость средней плотности тока с катода от напряжения смещения при напряженности электрического поля на аноде 60 кВ/см.

Моделирование внутренней инжекции и динамики пучка в ускорителе ИЛУ-14 проводилось в длинноволновом приближении методом макрочастиц с помощью модифицированной программы ExtraSAM [11]. Поскольку основной разброс в наборе фаз и скоростей электронов происходит в зазоре сетка-катод, стартовые параметры макрочастиц рассчитывались с помощью 2D модели ячейки сетки с учетом объемного заряда. Затем проводился 3D расчет динамики макрочастиц в ускорителе. На рисунке 12 кривые 2 показывают результаты расчета формы микро импульса тока на катоде (а) и на расстоянии 7500 мм от катода (б). Результаты расчета зависимости энергии от фазы ускоряющего поля также представлены на рис. 12 (кривые 1).

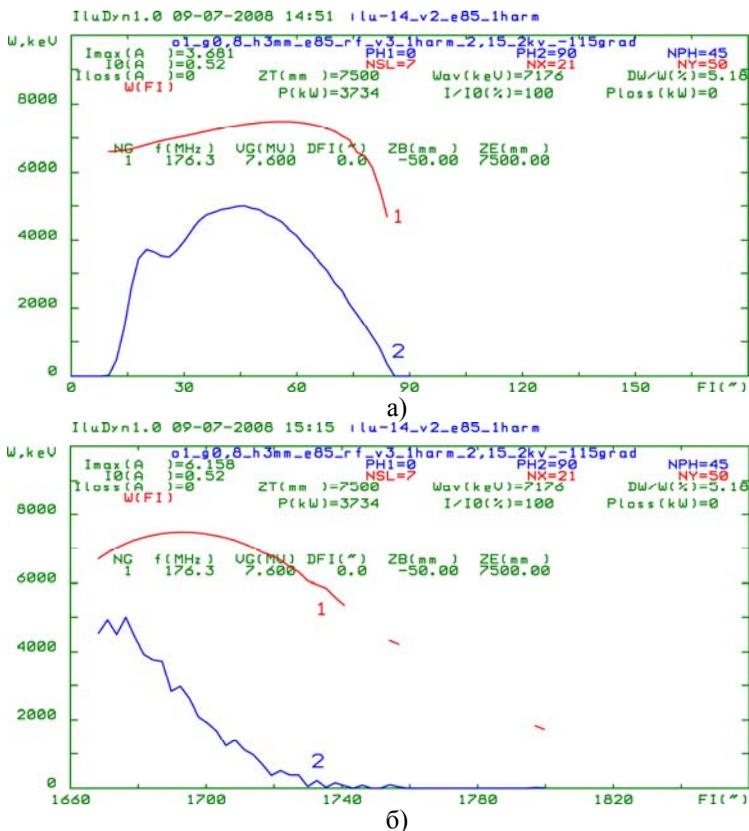


Рис. 12. Зависимости микро импульса тока и выходной энергии электронов от фазы ускоряющего поля: 1 – энергия электронов; 2 – форма микро импульса тока а) на катоде; б) на расстоянии 7500 мм от катода.

Выходная энергия электронов существенно зависит от фазы ускоряющего поля на катоде. Именно этот факт приводит к необходимости использования добавочного напряжения основной гармоники на зазоре сетка-катод для смещения микро импульса тока в оптимальную область фаз и сужения энергетического спектра пучка. Представленные на рис. 12 зависимости получены при амплитуде добавочного напряжения 2 кВ и сдвиге фаз 115° от ускоряющего поля. При этом на катод также подается постоянное запирающее напряжение 2.15 кВ. В результате этого г.м.с. отклонение энергии электронов от средней энергии пучка составляет всего 5.2 %. На рисунке 13 приведен энергетический спектр электронов на выходе ускорителя при использовании добавочного напряжения основной гармоники с амплитудой 2 кВ на зазоре сетка-катод.

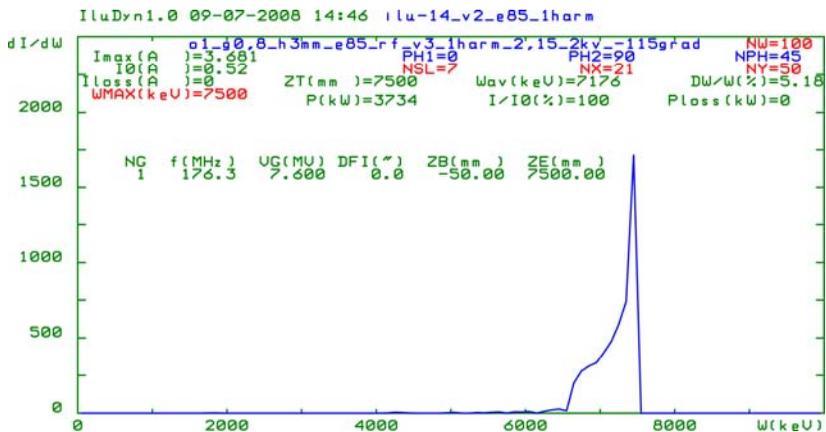


Рис. 13. Энергетический спектр электронного пучка на выходе из структуры.

На рисунке 14 показан вид траекторий электронов в ускорителе ИЛУ-14. Электроны, вылетающие из центра щелей в сетке по нормали к катоду, образуют центральное ядро пучка; вокруг ядра есть заметный ореол, образованный электронами, вылетающими с краев щелей под углом к нормали. Расчеты показали возможность проведения пучка через ускоритель за счет увеличения апертуры и эффекта ВЧ фокусировки.

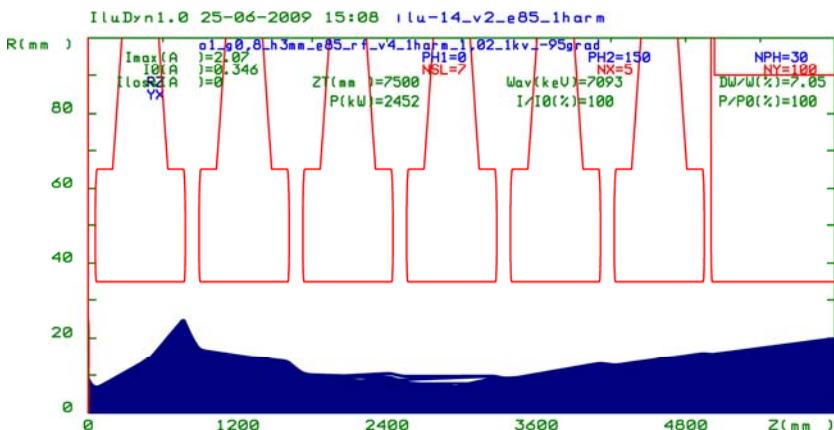


Рис. 14. Типичный вид траекторий электронов в УС.

На рисунке 15 показаны расчетные профили средней за макро импульс плотности тока пучка на разных расстояниях от ВЧ пучки.

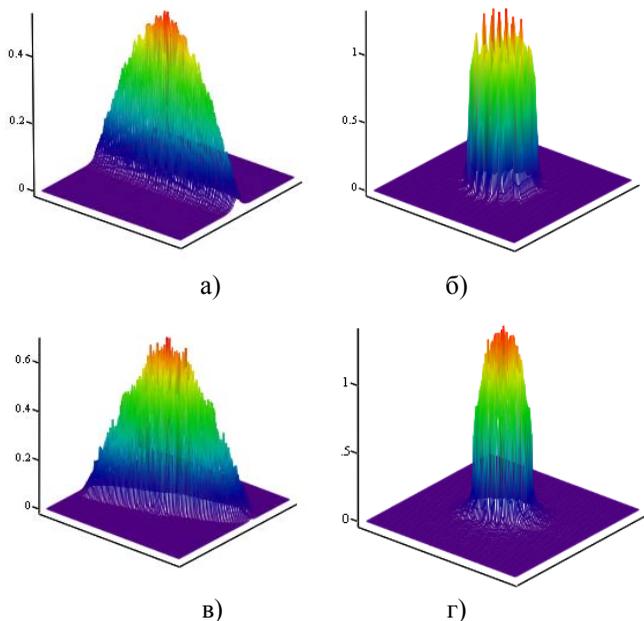


Рис. 15. Профили средней плотности тока пучка: а) – на входе во второй ускоряющий зазор; б) – на расстоянии 3000 мм от плоскости катода; в) – на выходе из ускоряющей структуры; г) – после фокусировки магнитной линзой.

Из-за разброса поперечных скоростей инжекции только поперек щелей в сетке профиль плотности тока пучка принимает эллиптическую форму на входе во второй ускоряющий зазор (рис. 15,а). ВЧ фокусировка приводит к постепенному устранению этого эффекта (рис. 15,б), но при этом происходит перефокусировка крайних частиц (рис. 15,в). Этот эффект можно устранить за счет дополнительной магнитной фокусировки пучка в устройстве развертки пучка по мишени (рис. 15,г).

5. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ПРОТОТИПА УСКОРИТЕЛЯ

Используемая модульная конструкция ВЧ системы и ускоряющей структуры дает возможность сборки ускорителя с заданными параметрами в диапазоне выходных энергий электронов от 5 до 10 МэВ. Для испытания основных узлов и элементов ускорителя был изготовлен и собран в

радиационно-защищенном бункере прототип ускорителя на энергию электронов 5 МэВ. Блок-схема прототипа ускорителя приведена на рис. 16.

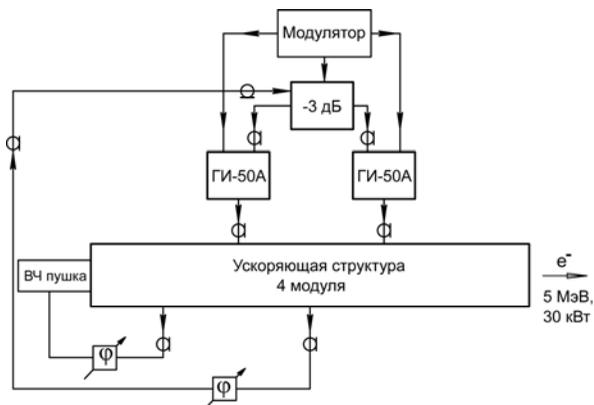


Рис. 16. Блок-схема 5 МэВ прототипа ускорителя.

ВЧ система прототипа включает в себя ускоряющую структуру, набранную из четырех модулей (см. рис. 2), триодную ВЧ пушку, 3 дБ кольцевой мост, два фидера, два ввода мощности и два усилительных каскада на лампах ГИ-50А. Мощность двух генераторов поступает по двум фидерам длиной 2λ на два ввода мощности и суммируется в ускоряющей структуре. Для организации положительной обратной связи автогенератора часть мощности (~ 300 кВт) отводится из ускоряющей структуры петлёй обратной связи, далее проходит через коаксиальную раздвижную фазосдвигающую линию на вход 3дБ кольцевого моста и поделенная на две равные части поступает на входы каскадов на лампах ГИ-50А. Модулятор ускорителя ИЛУ-10М [12] обеспечивает амплитуду импульсного анодного напряжения 30 кВ длительностью 450 мкс. Частота повторения импульсов до 50 Гц.

Далее более подробно приведены описания основных узлов прототипа ускорителя и результаты измерения их параметров.

5.1 Ускоряющая структура

Общий вид ускоряющей структуры прототипа представлен на рис. 17. Структура собрана из трёх полных, двух половинных (концевых) ускоряющих резонаторов и четырёх резонаторов связи.

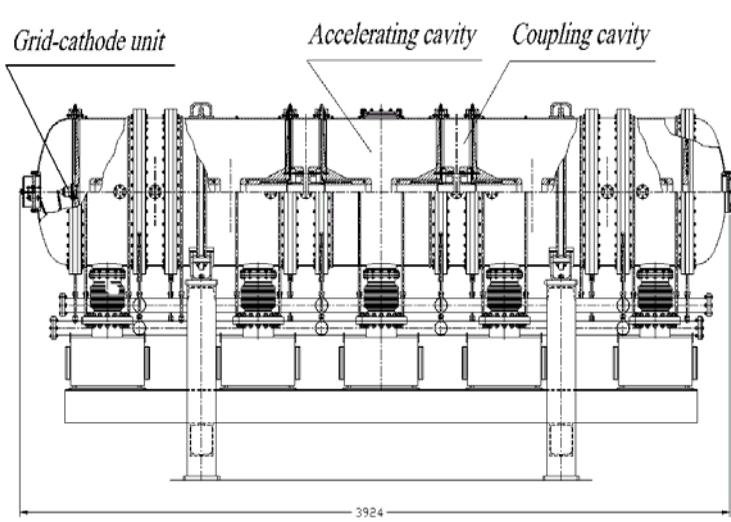


Рис. 17. Общий вид ускоряющей структуры.

Полный ускоряющий резонатор представляет собой полуволновый коаксиальный контур (см. рис. 4) и конструктивно состоит из трех частей (см. рис. 18): наружной обечайки диаметром 700 мм (справа), и двух торцевых стенок с цилиндрическими электродами (слева), обращенными друг к другу и образующими ускоряющий зазор 110 мм. Торцевые стенки имеют по две азимутальные щели связи. На наружных обечайках ускоряющих резонаторов расположены фланцы для подключения магнитоэлектрических насосов, ввода мощности, петли обратной связи и измерительных петель. Резонаторы связи имеют тот же диаметр обечайки (рис. 18, по центру, на заднем плане).



Рис. 18. Элементы ускоряющей структуры перед сборкой.

На рис. 19 показана начальная стадия изготовления элементов ускоряющей структуры.



Рис. 19. Заготовки элементов ускоряющей структуры: а) обечайки; б) торцевых стенок; в) соединительных фланцев обечайки.

На рис. 20 показана схема охлаждения ускоряющих резонаторов структуры, рассчитанная на режим работы ускорителя 5 МэВ. Из расчетов следует, что большая часть средней тепловой мощности ВЧ потерь выделяется на наружной поверхности электрода ускоряющего резонатора. Электрод имеет свою водяную ветвь охлаждения в виде медной трубки внутренним диаметром 8 мм, уложенной внутри электрода вблизи наружной поверхности. Торцевая стенка резонатора имеет свою ветвь охлаждения, выполненную такой же трубкой. Обечайки охлаждаются двумя параллельными ветвями, выполненными в виде напаянных на наружную поверхность медных шинок прямоугольного сечения с внутренним отверстием $\varnothing 8.5$ мм.

Ускоряющая структура изготовлена из меди вакуумной плавки. Элементы резонаторов и трубки охлаждения спаяны медно-серебряным припоем ПСр72 в вакуумной печи. Резонаторы соединяются между собой через индиевые уплотнения и образуют единый вакуумный объем.

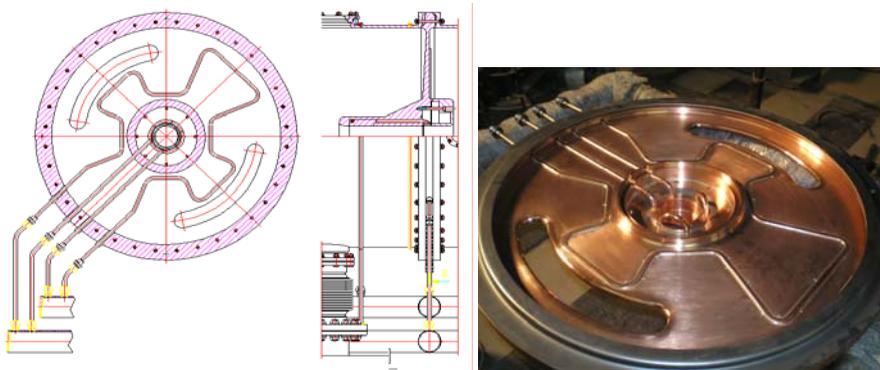


Рис. 20. Система охлаждения коаксиальной части и диска.

Для измерения и подгонки парциальных частот ячеек ускоряющая структура была собрана без индиевых уплотнений в вертикальном положении. Измерение парциальной частоты отдельной ячейки ускоряющей структуры можно провести, если отстроить собственные частоты соседних с ней ячеек. Отстройка производилась путем закорачивания зазоров соседних ячеек при помощи медных стержней, вводимых по оси структуры. Качество отстройки собственных частот данным методом было проверено с помощью численного моделирования.

Измерения показали, что разброс частот ускоряющих ячеек не превышал $\pm 10^{-3}$ и обеспечивался высокой точностью их изготовления. Частоты ячеек связи были ниже рабочей частоты на ~ 9 МГц. Подгонка их частоты была выполнена проточкой центральных съемных цилиндров ячеек связи.

После очистки поверхностей структура собиралась с индиевыми уплотнениями и проводились окончательные измерения парциальных частот резонаторов. Их значения указаны на общем виде ускоряющей структуры (рис. 21).

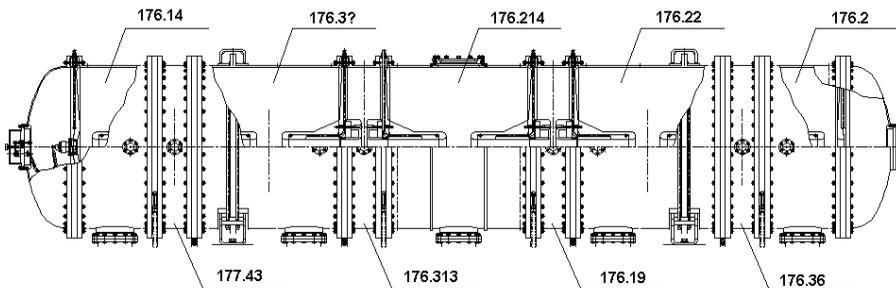


Рис. 21. Общий вид ускоряющей структуры с результатами измерений парциальных частот резонаторов после окончательной сборки.

Для определения полосы непрозрачности ускоряющей структуры были измерены частоты видов колебаний $\pi/2$ двух связанных цепочек резонаторов, отличающихся конечными элементами. Измерения показали, что полоса непрозрачности ускоряющей структуры мала и составляет 0.034 МГц.

Экспериментально частоты связи ускоряющей структуры были измерены анализатором ВЧ цепей (см. рис. 22).

Были проведены измерения относительных величин амплитуд полей рабочей моды в ускоряющих ячейках структуры методом малого возмущения при помощи диэлектрического шарика (таблица 2). Измерения с хорошей точностью совпали с результатами 3D расчетов.

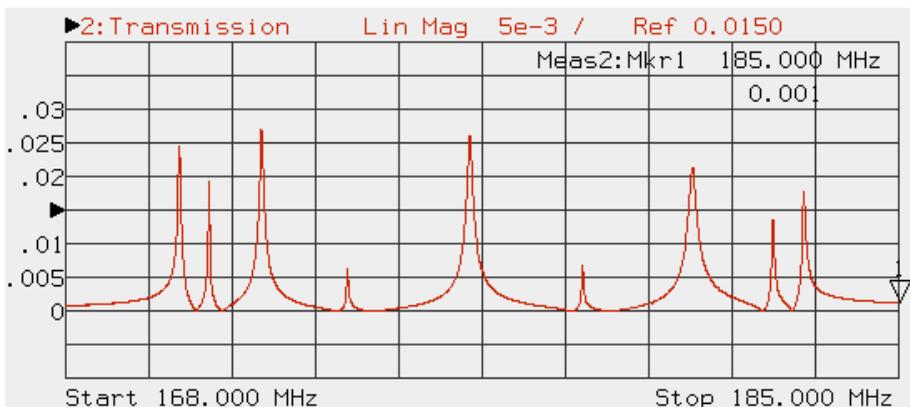


Рис. 22. Частоты связи ускоряющей структуры.

Таблица 2

Номер ячейки (ускоряющего резонатора)	1	2	3	4	5
Частота при введении шарика, МГц	176.284	176.288	176.288	176.288	176.293
Отклонение от частоты рабочей моды, кГц	-23	-19	-19	-19	-14
Нормированные значения полей	1.1	1	1	1	0.86

Различие напряженностей полей первого и пятого резонаторов связано с отличием геометрии их торцевых стенок.

Параметры ускоряющей структуры приведены в таблице 3.

Таблица 3

Рабочая частота, МГц	176.307
Добротность	21000
Характеристическое сопротивление, Ом	824
Шунтовое сопротивление, МОм	17.3
Коэффициент связи, %	7.8
Коэффициент пролета	0.986

5.2 Высокочастотная пушка

Конструктивная схема ВЧ пушки прототипа представлена на рис. 23. ВЧ пушка состоит из катода (1), сетки (2) и анода, роль которого выполняет противоположный электрод ускоряющей полуючейки структуры. Особенностью катодно-сеточного узла является щелевая сетка, обладающая большей прозрачностью по сравнению с ячеистыми сетками используемыми в ускорителях серии ИЛУ.

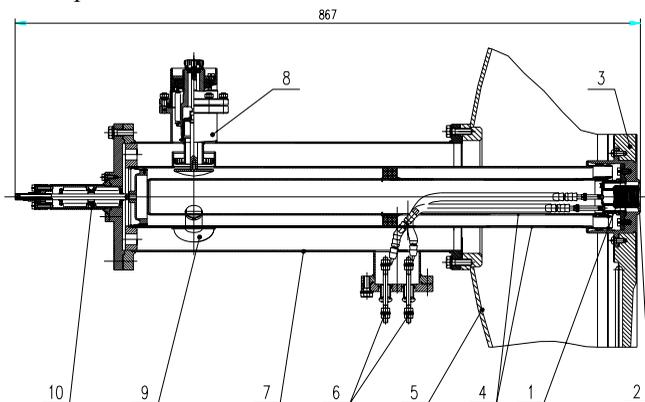


Рис. 23. ВЧ пушка. 1 – катодный узел, 2 – сетка, 3 – передняя стенка ускоряющей структуры, 4 – коаксиальный полуволновый резонатор, 5 – крышка вакуумного бака, 6 – вводы накала, 7 – вакуумный стакан, 8 – узел ввода ВЧ мощности, 9 – контроль ВЧ, 10 – подстройка частоты.

Катодно-сеточный узел триодной пушки размещен в центре передней стенки (3) первой полуючейки ускоряющей структуры. Катод (1) установлен на изоляторе и находится под постоянным запирающим потенциалом по отношению к заземленной сетке (2). Таблетка катода диаметром 20 мм выполнена из гексаборида лантана (LaB_6). Расстояние между сеткой и катодом 1 мм в нагретом состоянии катода. Для сужения спектра ускоренных электронов и оптимизации их продольной динамики по токопрохождению на зазор сетка-катод подается дополнительное ВЧ напряжение рабочей частоты необходимой амплитуды и фазы. Это напряжение формируется в полуволновом коаксиальном резонаторе (4), нагруженном на одном конце емкостью сетка-катод, а на другом, переменной емкостью подстройки частоты (10). ВЧ мощность поступает из ускоряющей структуры по 50 Ом кабелю через фазосдвигающую линию и направленный ответвитель на узел ввода мощности (8), который обеспечивает регулировку связи с резонатором ВЧ пушки. В пучности тока коаксиального резонатора выведены проводники (6) питания подогревателя катода, по которым также подается напряжение смещения.

Измеренная добротность резонатора 700, волновое сопротивление 15 Ом. При работе с пучком резонатор должен быть нагружен до значения добротности $10 \div 20$. Это необходимо для уменьшения нерегулируемой по фазе добавки к амплитуде ВЧ напряжения на катоде за счет проницаемости сетки.

Общий вид ВЧ пушки на измерительном стенде приведен на рис. 24.



Рис. 24. ВЧ пушка на измерительном стенде.

5.3 Ввод мощности

Ввод мощности (см. рис. 25) представляет собой низкоомную коаксиальную линию (5) с размерами: $D = 160$ мм, $d = 100$ мм. Волновое сопротивление этой линии близко к оптимальной величине $W = 30$ Ом, обеспечивающей минимальную напряженность электрического поля на поверхности центрального проводника. Один конец линии закорочен, а другой переходит в петлю связи (1), индуктивность которой компенсирована конструктивной емкостью. Вакуумная часть ввода мощности отделена от атмосферы цилиндрическим изолятором (2) с размерами $D=80$ мм, $d=70$ мм и $h = 60$ мм. из керамики 22ХС ($\epsilon = 9.3$, $\tan\delta = 7 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 13.4$ Вт/м·К). Механическая развязка керамики от жесткого коаксиала осуществляется сильфоном (3). Предусмотрено также водяное охлаждение (6). Ввод устанавливается на резонаторе ускоряющей структуры. Уплотнение на вакуум производится посредством индиевой проволоки диаметром 1 мм. Высокочастотная мощность подводится 50 Ом фидером (4) в месте, разделяющем коаксиальную часть ввода на четвертьволновый изолятор и четвертьволновый трансформатор. Величина передаваемой импульсной мощности 2 МВт при средней мощности до 50 кВт. Конструкция ввода позволяет изменять связь с ускоряющей структурой путем поворота петли связи. Общий вид ввода мощности показан на рис. 26.

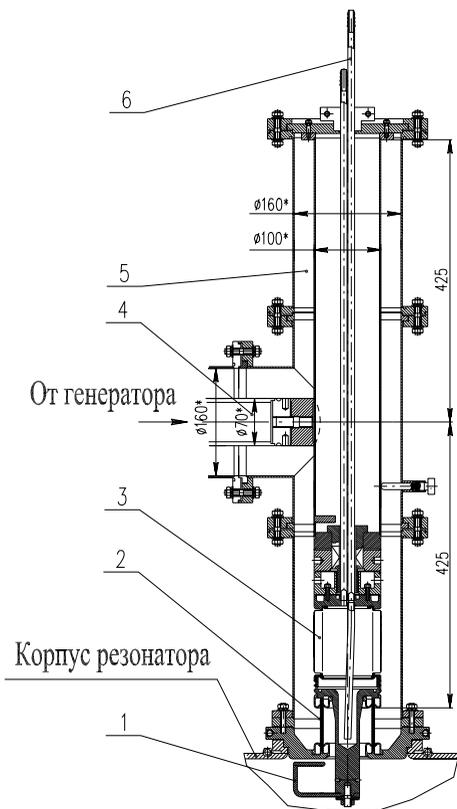


Рис. 25. Конструкция ввода мощности.



Рис. 26. Общий вид ввода мощности.

5.4. Генератор

На рис. 27 приведена схема ВЧ генератора на металлокерамическом триоде ГИ-50А. Анодно-сеточный контур (1) представляет собой короткозамкнутую коаксиальную линию длиной $3\lambda/4$ с волновым сопротивлением 28 Ом. (диаметр внутренней трубы 220 мм, диаметр наружной трубы – 350 мм). Перестройка анодно-сеточного контура по частоте осуществляется перемещением короткозамыкающего плунжера (4). Во внутреннюю трубу контура вблизи пучности высокочастотного напряжения включены последовательно два разделительных конденсатора типа КВК-5-1500 пФ – 20 кВ (2). Импульсное напряжение питания подводится к аноду лампы через высокочастотный LC-фильтр (5). Сетка лампы заземлена. Входное устройство (6) генератора выполнено в виде полуволнового коаксиального контура, к которому через разделительный

конденсатор в нужной для согласования точке подключен фидер, по которому поступает мощность возбуждения. Диаметр наружной трубы коаксиального контура – 170 мм, диаметр внутренней трубы – 140 мм. Волновое сопротивление фидера 50 Ом (наружный диаметр Ø110 мм). Напряжение накала на генераторную лампу (3) подается с помощью четвертьволнового дросселя в виде двухпроводной полосковой линии в точке минимума высокочастотного напряжения катодного контура. При анодном напряжении 30 кВ мощность генератора 2 МВт.

Возбуждение ускоряющей структуры производится двумя генераторами. Общий вид генераторов на испытательном стенде показан на рис. 28.

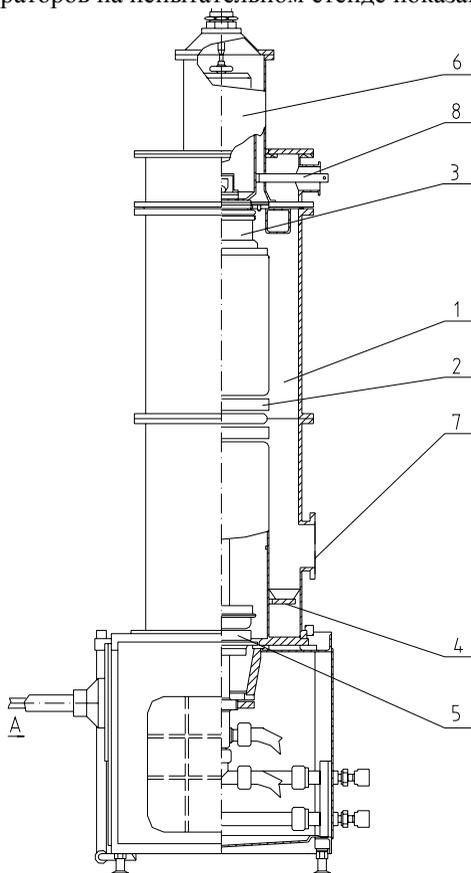


Рис. 27. Схема генератора. 1 – анодно-сеточный контур, 2 – анодный разделительный конденсатор, 3 – генераторная лампа ГИ-50А, 4 – закорачивающий плунжер, 5 – анодный LC-фильтр, 6- катодный контур, 7 – фланец для подключения выходного устройства, 8 – ввод накала генераторной лампы.



Рис. 28. Два генератора с коаксиальными фидерами.

6. ИСПЫТАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПРОТОТИПА

Испытания ускоряющей структуры прототипа проводилось на стенде, размещенном в радиационно-защищенном бункере (рис. 29).



Рис. 29. Ускоряющая структура прототипа с системой развертки в бункере.

После шестичасовой откачки в ускоряющей структуре получен вакуум $5 \cdot 10^{-8}$ Торр, что является хорошим результатом для непрогретного объема. При частоте следования импульсов $(1 \div 25)$ Гц потребовалось всего 3 часа тренировки для преодоления высокочастотного разряда (мультипактора). На четырехмодульной структуре уровень ускоряющего напряжения 7.5 МВ также был достигнут в течение двух часов. Таким образом, структура, состоящая из шести модулей будет иметь достаточную электрическую прочность для ускорения электронов до энергии 10 МэВ. В таблице 4 приведены расчетные параметры ускорителя ИЛУ-14 на энергию 7.5 МэВ и 10 МэВ мощностью 100 кВт.

Таблица 4

Вариант	1	2
Количество генераторов	4+1	4+1
Энергия, МэВ	10	7.5
Электронный КПД, %	68	77
Промышленный КПД, %	26	30

Далее для работы ускорителя с токами ~ 600 мА была оптимизирована связь ускоряющей структуры с передающими фидерами. При значении постоянной составляющей импульса тока 600 мА и энергии ускоренных электронов 5 МэВ необходима мощность генератора порядка 4 МВт.

6.1. Проведение пучка электронов

Оптимизация проводки пучка через ускоряющую структуру осуществлялась путем сравнения измеренных величин тока пучка с катода и тока на выходе из структуры. Цилиндр Фарадея был установлен на расстоянии 1150 мм от выходного фланца ускорителя.

Токопрохождение электронного пучка через структуру без подачи ВЧ напряжения на катод пушки составляет 80%. При подаче оптимального по амплитуде и фазе ВЧ напряжения на зазор сетка-катод удалось получить импульсный ток с катода 600 мА при коэффициенте прохождения 96%. Это хорошо согласуется с результатами численного моделирования.

При работе прототипа на большой мощности использовалось выпускное устройство с линейной разверткой пучка вдоль окна с выпуском в атмосферу через титановую фольгу. Пучок сбрасывался на алюминиевый коллектор, охлаждаемый водой. Перед магнитом линейной развертки был установлен дуплет квадрупольных линз для формирования поперечного размера пучка в пределах $20 \div 30$ мм на поверхности фольги выпускного окна.

Средняя мощность пучка оценивалась:

- а) как произведение средней энергии (которая определялась по результатам измерения спектра электронов пучка) на средний ток коллектора;
- б) калориметрическим методом.

При амплитуде импульса ускоренного тока на коллекторе 480 мА (ток инжекции с катода пушки 500 мА), длительности импульса 420 мкс, частоте повторения 33 Гц мощность пучка измеренная калориметрическим методом составляла 33 ± 2 кВт. Мощность, рассчитанная по средней энергии и среднему току 34.2 ± 1 кВт. Совпадение хорошее.

6.2. Измерение энергетического спектра пучка

Измерение энергии ускоренных электронов производилось с помощью магнитного спектрометра с неоднородным магнитным полем ($n = 0.5$), углом поворота 148 градусов и радиусом поворота 200 мм. Ток пучка фиксировался на цилиндре Фарадея, установленном после спектрометра. На входе и выходе спектрометра расположены взаимно согласованные коллимирующие щели шириной 2 мм. За энергию ускоренного пучка принималось значение, соответствующее максимуму спектрального распределения.

Результаты измерения спектров пучка при токе с катода 300 мА без подачи и с подачей на катод дополнительного ВЧ напряжения амплитудой 0.7 кВ показывают, что с дополнительным ВЧ напряжением максимум тока на выходе спектрометра увеличивается и смещается в область более высоких энергий. Согласно расчетам, это происходит вследствие инжекции микроимпульсов тока пучка в более ранних оптимальных фазах ускоряющего поля.

6.3. Измерение поперечного размера пучка

Измерение размера пятна пучка на выходе из ускоряющей структуры проводилось методом прожигания отверстия в фольге толщиной 0.25 мм. Фольга устанавливалась перед цилиндром Фарадея на расстоянии 1150 мм от выхода из структуры. Время экспозиции пучка на фольге подбиралось таким, чтобы достигнуть режима установившегося тока пучка на цилиндре Фарадея и составляло около 2 минут.

На рисунке 30 показана фольга, прожженная пучком 200 мА. С учетом видимого на фотографиях ореола пучка результаты измерений хорошо совпали с расчетами. Как и предсказывалось в расчетах, пучок имеет максимальный размер в направлении, перпендикулярном направлению щелей сетки.



Рис. 30. След пучка на фольге и катодно-сеточный узел (диаметр сетки 20 мм).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН успешно прошел стендовые испытания в импульсном режиме прототип мощного промышленного ускорителя электронов. Полученные параметры приведены в таблице 5.

Таблица 5

Максимальное ускоряющее напряжение, МВ	7.5
Максимальный импульсный ток пучка, мА	600
Коэффициент токопрохождения пучка, %	96
Импульсная мощность пучка (при энергии электронов 5 МэВ), МВт	2.5
Длительность импульса, мкс	420
Средняя мощность пучка (при частоте повторения 33 Гц), кВт	33

При частоте повторения импульсов 50 Гц средняя мощность пучка будет 50 кВт.

Результаты испытаний подтверждают возможность создания на основе разработанных модулей ускорителя ИЛУ-14 с энергией электронов до 10 МэВ и мощностью в пучке до 100 кВт. Ускоряющая структура в этом случае должна быть составлена из шести модулей; необходимая ВЧ мощность обеспечивается сложением в ускоряющей структуре мощности четырех выходных каскадов на лампах ГИ-50А.

Узкий энергетический спектр ускоренных электронов позволяет использовать ускоритель как в электронной, так и гамма-моде, что расширяет область применения в промышленности. Дальнейшее увеличение мощности пучка и энергии электронов возможно при наращивании числа модулей в ускоряющей структуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rhodotron TT300. Product Description. Ion Beam Applications, Belgium, 1997.
- [2] *G. Loda*. Private communication.
- [3] *В.Л. Ауслендер, Г.И. Будкер, Г.Б. Глаголев и др.* Высокочастотный ускоритель электронов. - А.С. №527112, 1976.
- [4] *В.Л. Ауслендер, В.В. Безуглов, А.А. Брызгин и др.* Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-8. // ПТЭ, 2009. №3, с.98.
- [5] *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.
- [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, pp.3002-3004.
- [7] *В.Ф. Видулов, В.Е. Калюжный.* "Влияние погрешностей изготовления на характеристики ускоряющих структур со стоячей волной". ЖТФ, 1980.Том.50, в.4.
- [8] Справочник по диафрагмированным волноводам. // М.: "Энергоатомиздат", 1991.
- [9] *В.Л. Ауслендер, И.Г. Макаров, Г.Н. Острейко и др.* Сужение энергетического спектра в ускорителе ИЛУ-10. // ПТЭ, 2009. №4, с.137
- [10] *M.A.Tiunov et al.* Precision modeling of the internal injection and beam dynamics for a high-power RF accelerator. // NIM A, 558 (2006), pp. 77–88.
- [11] *M.A. Tiunov et al.* Proceeding of PAC 2005, pp. 1419-1421.
- [12] *В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин и др.* Ускорители электронов типа ИЛУ для промышленных технологий. // Вестник "Радтех-евразия", №1(9). Новосибирск, 1999, с.32.

*В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов, И.В. Горнаков,
Е.Н. Кокин, Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин, И.Г. Макаров,
С.А. Максимов, Н.В. Матяш, Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов,
Г.В. Сердобинцев, А.В. Сидоров, В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко,
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, В.О. Ткаченко, Б.Л. Факторович,
К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

Разработка ускорителя ИЛУ-14 и испытание его прототипа

*V.L. Auslender, A.A. Bryazgin, K.N. Chernov, V.G. Cheskidov,
B.L. Faktorovitch, V.A. Gorbunov, I.V. Gornakov, E.N. Kokin,
G.I. Kuznetsov, A.N. Lukin, I.G. Makarov, S.A. Maximov,
N.V. Matyash, G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, G.V. Serdobintsev,
A.V. Sidorov, V.M. Radchenko, N.D. Romashko, V.V. Tarnetsky,
M.A. Tiunov, V.O. Tkachenko*

Development of ILU-14 accelerator and TEST of its prototype

ИЯФ 2010-2

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 9.02. 2010 г.

Сдано в набор 11.02. 2010 г.
Подписано в печать 12.02. 2010 г.
Формат 60х90 1/16 Объем 2.0 печ.л., 1.8 уч.-изд.л.
Тираж 135 экз. Бесплатно. Заказ № 2

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