

## ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА ИЛУ-14

© 2011 г. А. А. Брызгин, В. И. Безуглов, Е. Н. Кокин, М. В. Коробейников, Г. И. Кузнецов, И. Г. Макаров, Г. Н. Острейко, А. Д. Панфилов, В. М. Радченко, Г. В. Сердобинцев, А. В. Сидоров, В. В. Тарнецкий, М. А. Тиунов, Б. Л. Факторович, К. Н. Чернов, В. Г. Ческидов

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

*Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 26.11.2010 г.

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 к.п.д. 26%. Ускоритель имеет модульную структуру, что позволяет путем изменения модульной комплектации менять в определенных пределах энергию электронов и мощность в пучке. В настоящее время изготовлен и успешно прошел испытания прототип этого ускорителя. В экспериментах подтверждены расчетные параметры: энергия 5 МэВ, средний за в.ч.-период ток пучка 600 мА, импульсная мощность пучка 2.5 МВт и электронный к.п.д. ускоряющей структуры 68%. Благодаря подаче дополнительного в.ч.-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.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время благодаря большой проникающей способности тормозного излучения повышен интерес к радиационным технологиям с его использованием, применяемым, в частности, для пастеризации пищевых продуктов, дезинфекции медицинских отходов и т.д. В связи с этим необходимы ускорители с энергией пучка 7.5–10 МэВ и средней мощностью в пучке  $\geq 100$  кВт.

Важнейшим параметром для промышленных ускорителей является эффективность преобразования энергии источника в.ч.-мощности в энергию заряженных частиц (к.п.д.). 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. Ускоритель работает в непрерывном режиме, высокий к.п.д. 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; к.п.д. ускоряющей структуры  $\approx 73\%$ , рабочая частота 107.5 МГц.

2. Импульсный линейный ускоритель. Высокий к.п.д. обеспечивается значительной нагрузкой ускоряющих структур импульсным током ускоряемых частиц. В качестве примера можно привести ускоритель SureBeam Corporation, работающий на частоте 1.3 ГГц и имеющий мощность

пучка 120 кВт, энергию электронов 5 МэВ, к.п.д. 70% [2].

В ИЯФ СО РАН создана серия ускорителей типа ИЛУ [3–5] с энергией до 5 МэВ и мощностью в пучке до 50 кВт. Для расширения области применения этих ускорителей разработан новый мощный (до 100 кВт) промышленный ускоритель электронов на энергию 7.5–10 МэВ. Модель получила название ИЛУ-14 и предназначена для использования как в режиме облучения электронным пучком, так и в режиме тормозного излучения. ИЛУ-14 унаследовал основные характеристики ускорителей серии ИЛУ, такие как внутренний тип инъекции и использование автогенератора в качестве источника в.ч.-мощности, однако имеет и ряд отличительных особенностей. На базе ИЛУ-14 планируется создание простых и надежных в эксплуатации в.ч.-ускорителей, способных конкурировать с существующими промышленными ускорителями в данном диапазоне энергий.

### 2. КОНЦЕПЦИЯ И БЛОК-СХЕМА ИЛУ-14

Мощный промышленный ускоритель ИЛУ-14, блок-схема которого представлена на рис. 1, содержит: ускоряющую структуру, триодную электронную в.ч.-пушку, двухкаскадный автогенератор, фидерную систему, в.ч.-вводы мощности, модуляторы, систему развертки и конвертер (при работе ускорителя в режиме тормозного излучения).

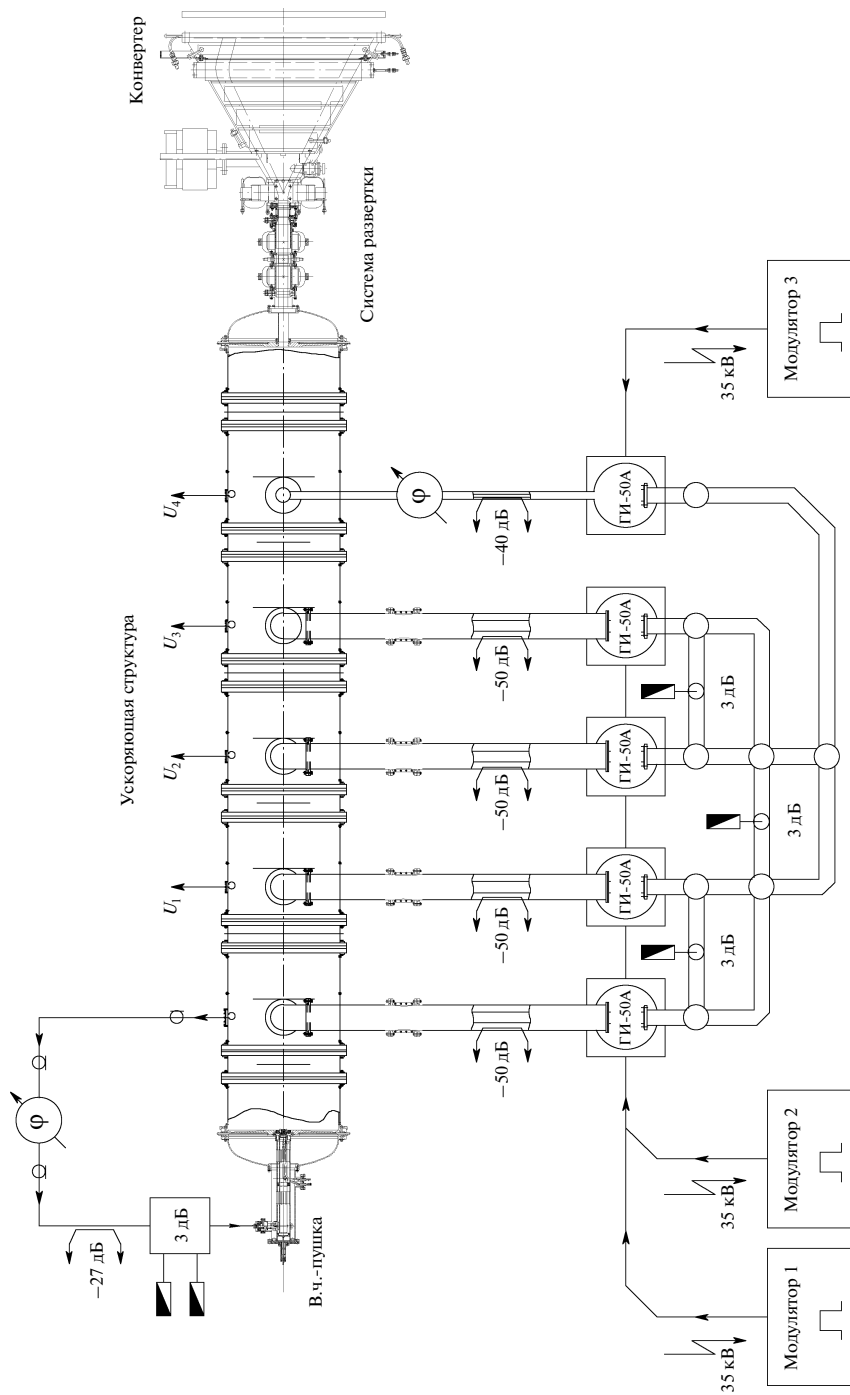


Рис. 1. Блок-схема ИЛУ-14. ГИ-50А — триоды;  $\varphi$  — фазовращатель (фазосдвигающая линия).

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

1. Использование для ускорения электронов низкочастотной многорезонаторной структуры 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 (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 конкурентоспособное значение промышленного к.п.д.

2. Использование в качестве источника электронов триодной в.ч.-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 тормозное излучение, обеспечивается благодаря подаче дополнительного в.ч.-напряжения на зазор сетка–катод этой пушки.

3. 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.

4. 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 и сравнение не только электродинамических характеристик, но и коммерческих показателей, таких как стоимость изготовления, надежность работы и эксплуатационные расходы. Достижение оптимума некоторых характеристик требует поиска компромисса. К таким характеристикам можно отнести шунтовое сопротивление, показывающее эффективность использования высококачественной мощности для ускорения частиц, и коэф-

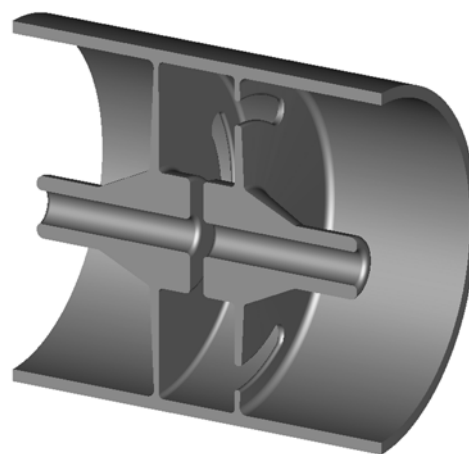


Рис. 2. Модуль ускоряющей структуры.

фициент 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 снижает стоимость изготовления, однако при этом уменьшается шунтовое сопротивление и затрудняется охлаждение резонаторов.

Принятая концепция построения ускорителя, предусматривающая внутреннюю инжекцию электронов и проведение их в тракте ускорителя без применения магнитостатических линз, оказала значительное влияние на выбор не только профиля ускоряющих ячеек, но и характерных размеров ускорителя в целом.

Ускоряющая структура, общий вид которой приведен на рис. 3, состоит из пяти полных и двух половинных (концевых) ускоряющих резонаторов и шести резонаторов связи. 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 исключения связи через ячейку щели в противоположных стенках резонаторов связи повернуты друг относительно друга на  $90^\circ$ .

Геометрия резонаторов ускоряющей структуры была оптимизирована с помощью программы SuperLANS [6]. На рис. 4 показан профиль полного ускоряющего резонатора. Он представляет собой полуволновый коаксиальный резонатор с внешним диаметром 700 мм и ускоряющим зазо-

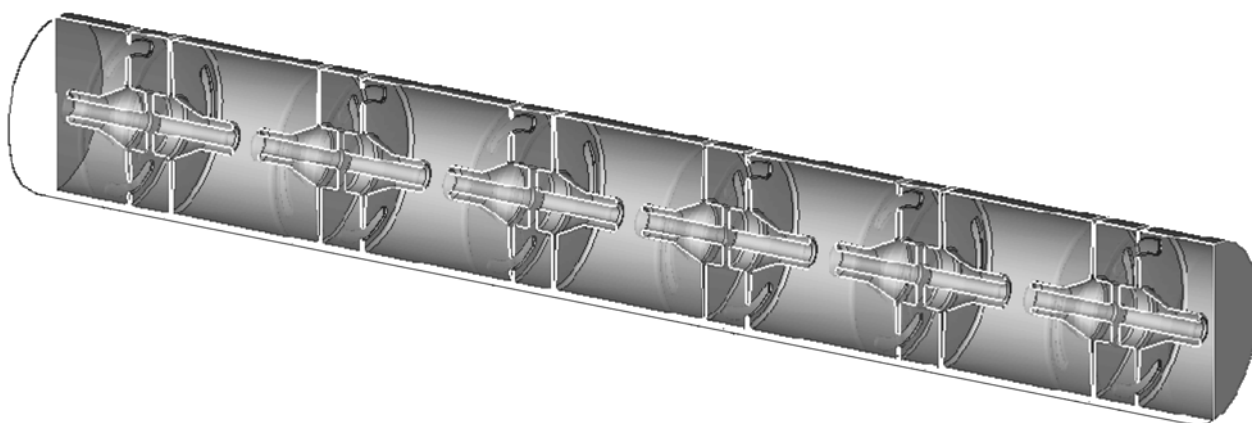


Рис. 3. Общий вид ускоряющей структуры ИЛУ-14.

ром 110 мм. Расчетные электродинамические параметры ускоряющей структуры приведены ниже:

Рабочая частота, МГц	176
Добротность	22000
Характеристическое сопротивление, Ом	1240
Шунтовое сопротивление, МОм	27.3
Коэффициент связи	0.078

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

Для задания требуемой точности изготовления ячеек структуры полезно определить производные частот по их размерам, т.е. чувствительность к погрешностям изготовления и деформациям

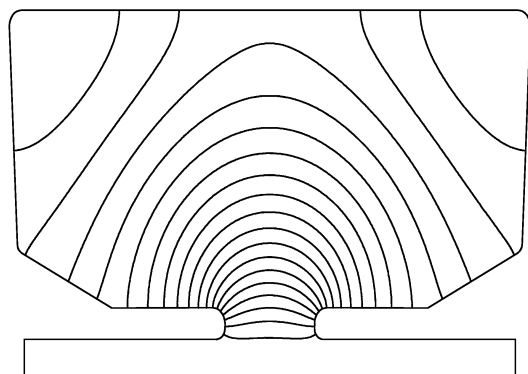


Рис. 4. Оптимизированный профиль полного ускоряющего резонатора.

(рис. 5). Анализ рис. 5 показывает, что наибольшее влияние на частоту оказывают размеры пролетных зазоров в ячейках связи  $S_2 = 3.2$  МГц/мм и в ускоряющих ячейках  $S_1 = 0.45$  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 мало.

Основное влияние на неравномерность ускоряющего поля и уменьшение шунтового сопротивления оказывает разброс частот ускоряющих ячеек. 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.

Расчет, результат которого представлен на рис. 6, проводился при разбросе частот двух ускоряющих ячеек: половинной на  $\Delta f/f = +5 \cdot 10^{-3}$  и полной на  $\Delta f/f = -5 \cdot 10^{-3}$ . Можно отметить нарушение равномерности ускоряющего поля вдоль структуры и появление поля в ячейках связи. Уменьшение шунтового сопротивления составило  $\sim 3\%$ . Таким образом, коэффициент связи 7–8% обеспечивает достаточную стабильность параметров структуры при расстройках ускоряющих ячеек в пределах  $\Delta f/f = \pm 5 \cdot 10^{-3}$ .

Вычисления коэффициента связи и девиации собственных частот ячеек в зависимости от азимутальной протяженности щели проводились по методике, описанной в [7]. На рис. 7 приведены результаты расчета коэффициента связи. Девиация собственных частот ячеек в зависимости от азимутальной протяженности щели показана на рис. 8. Изготовление щелей с точностью  $\pm 1.5$  мм приемлемо, так как приводит к уменьшению шунтового сопротивления не более чем на 2%.

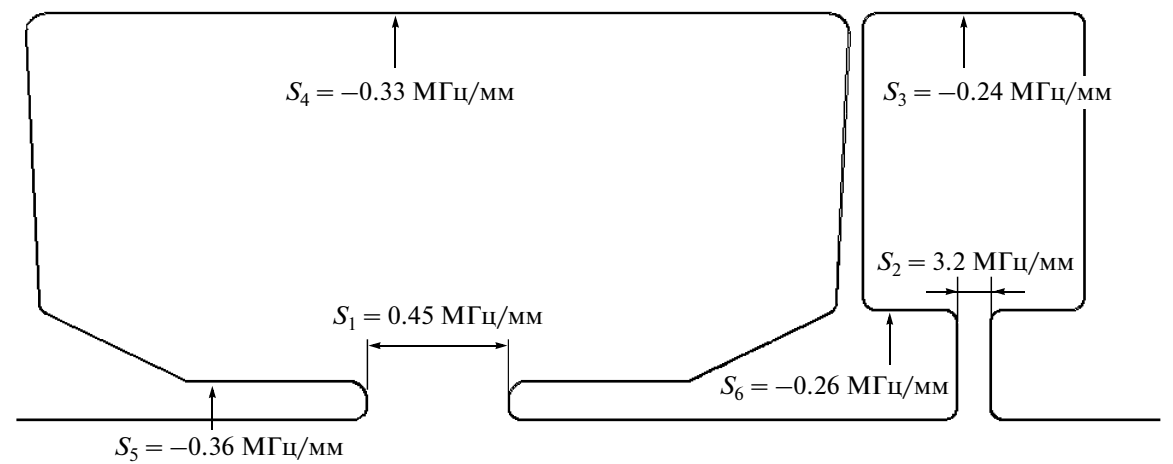


Рис. 5. Степень влияния на частоту изменения размеров зазоров ( $S_1, S_2$ ) и диаметров ( $S_3-S_6$ ).

#### 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 в.ч.-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 классе С).

Для уменьшения потерь и сужения спектра пучка подается дополнительное в.ч.-напряжение смещения на зазор сетка-катод. Регулируя ам-

плитуду и фазу этого в.ч.-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 низкоэнергичной части спектра пучка [8].

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 обеспечения 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,

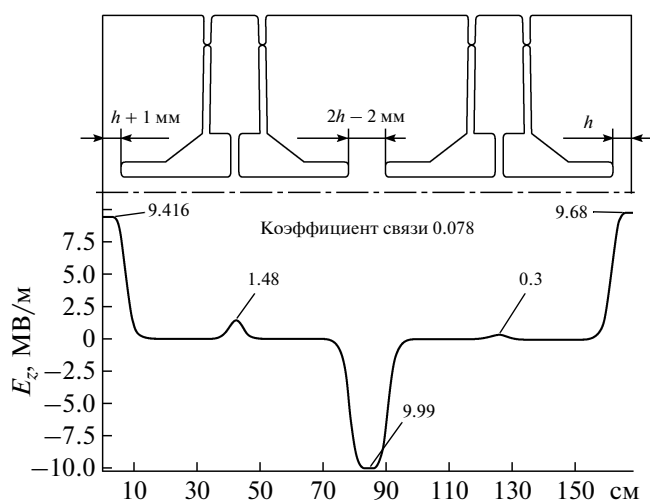


Рис. 6. Флуктуации полей  $E_z$  в ячейках при отличии частот ускоряющих ячеек: половинной  $-\Delta f/f = +5 \times 10^{-3}$ ; полной  $-\Delta f/f = -5 \cdot 10^{-3}$ .

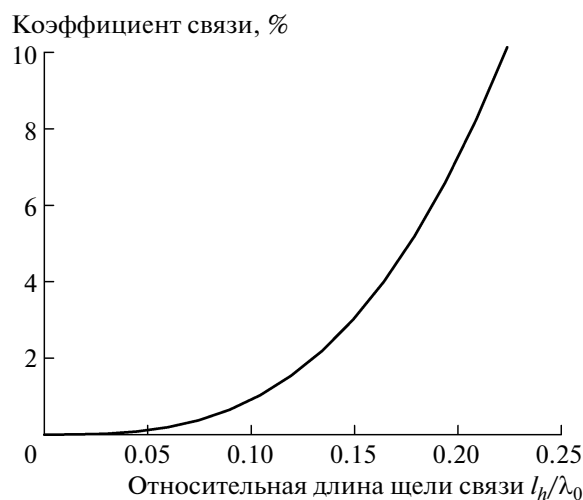


Рис. 7. Зависимость коэффициента связи от азимутальной протяженности щели  $l_h/\lambda_0$ , где  $l_h$  — длина щели;  $\lambda_0$  — длина волны.

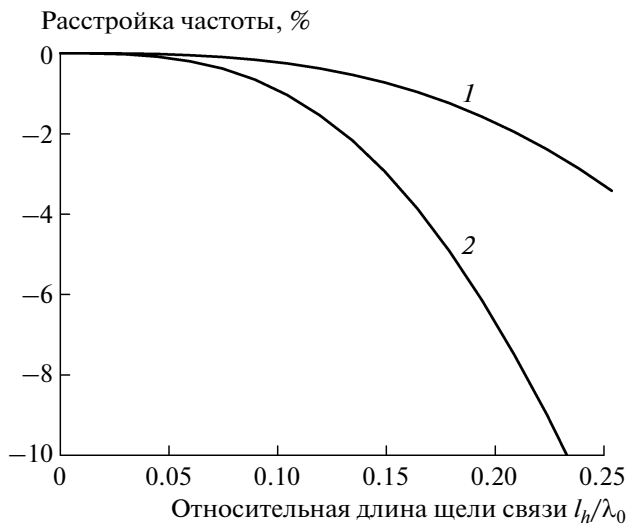


Рис. 8. Зависимость изменения собственных частот ячеек от азимутальной протяженности щели для ускоряющего резонатора (1) и резонатора связи (2).

зазоры становятся не достижимы по точности изготовления и по электрической прочности. Во-вторых, вследствие островкового эффекта сильно возрастают нелинейность вольт-амперной характеристики и величина запирающего напряжения смещения.

Для увеличения прозрачности сетки в ускорителе ИЛУ-14 использован катодно-сеточный узел с щелевой сеткой, щели которой имеют разную длину, но одинаковую ширину между эквидистантно натянутыми параллельными проволочками (рис. 9). Помимо того что щелевая сетка обладает большей прозрачностью по сравнению с ячеистой сеткой, ее электронно-оптические свойства могут быть с хорошей точностью численно промоделированы в двумерном приближении. На рис. 10 представлена двумерная модель катодно-

сеточного узла с основными геометрическими параметрами: зазором катод–сетка  $d$ , шагом сетки  $h$ , диаметром проволочек  $D$ .

В статическом приближении с помощью программы SAM [9] был проведен 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 вольт-амперных характеристик был испытан триод со стандартным катодным узлом из  $\text{LaB}_6$  диаметром 20 мм, анодом из графита и сеткой с вышеприведенными параметрами. Приведенные на рис. 11 расчетные и экспериментальные зависимости средней плотности тока с катода от напряжения смещения показали хорошее совпадение.

Моделирование внутренней инжекции и динамики пучка в ускорителе ИЛУ-14 проводилось в длинноволновом приближении методом макрочастиц с помощью модифицированной программы ExtraSAM [10]. Поскольку основной набор разбросов 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 рис. 12 приведены результаты расчета зависимости энергии от фазы ускоряющего поля (кривая 1) и формы микроимпульса тока на расстоянии 7.5 м от катода (кривая 2).

Выходная энергия электронов существенно зависит от фазы ускоряющего поля на катоде. Именно этот факт обусловил необходимость использования добавочного напряжения основной гармоники на зазоре сетка–катод для смещения микроимпульса тока в оптимальную область фаз и сужения энергетического спектра пучка. Представленные на рис. 12 зависимости получены при

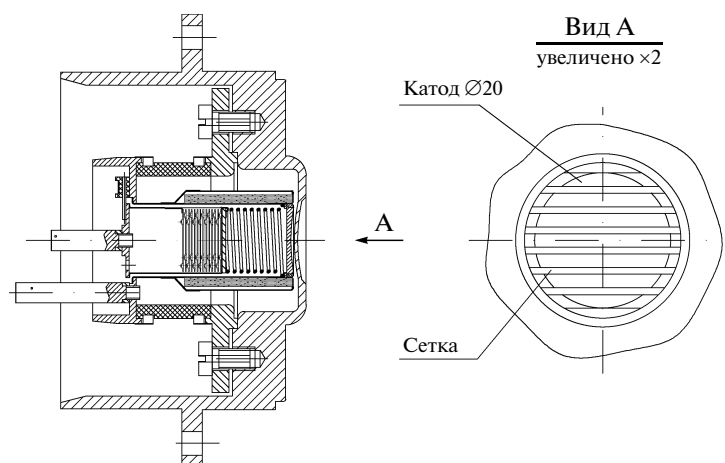


Рис. 9. Общий вид катодно-сеточного узла с щелевой сеткой.

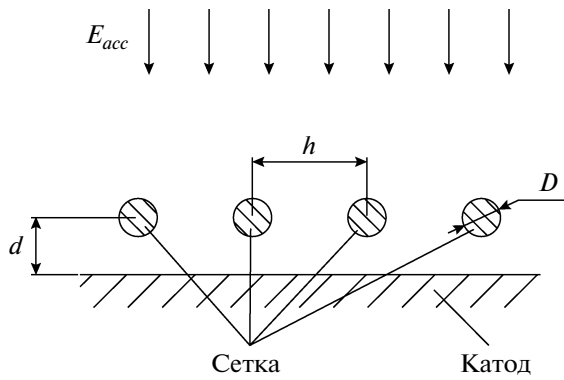


Рис. 10. Двумерная модель катодно-сеточного узла.  $E_{acc}$  – ускоряющее в.ч.-поле.

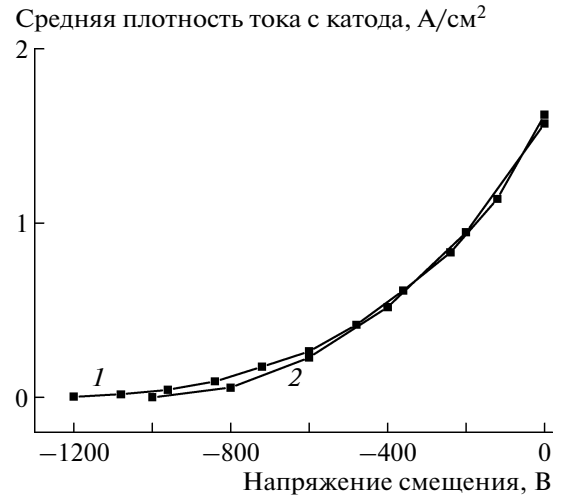


Рис. 11. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости средней плотности тока с катода от напряжения смещения при напряженности электрического поля на аноде 60 кВ/см.

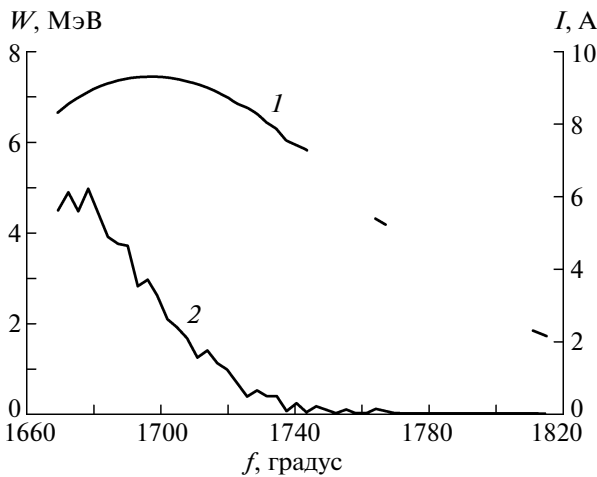


Рис. 12. Зависимости выходной энергии электронов (1) и формы микроимпульса тока (2) от фазы ускоряющего поля на расстоянии 7.5 м от катода.

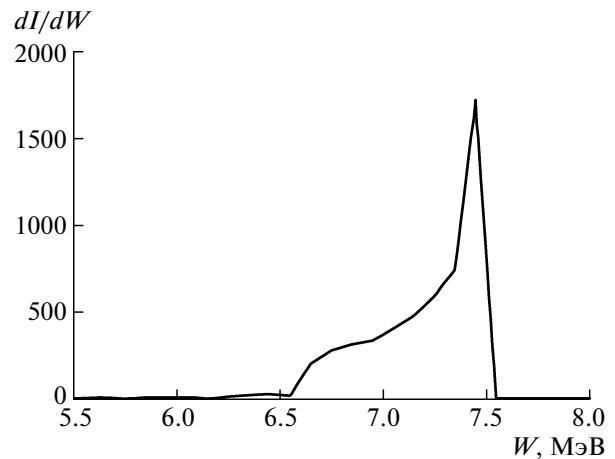


Рис. 13. Расчетный энергетический спектр электронного пучка на выходе из структуры.

амплитуде добавочного напряжения 2 кВ и сдвиге фаз  $115^\circ$  от ускоряющего поля. При этом на катод также подается постоянное запирающее напряжение 2.15 кВ. В результате среднеквадратичное отклонение энергии электронов от средней энергии пучка составило всего 5.2%. На рис. 13 приведен энергетический спектр электронов на выходе ускорителя при использовании добавочного напряжения основной гармоники с амплитудой 2 кВ на зазоре сетка–катод.

На рис. 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 в.ч.-фокусировки.

На рис. 15 показаны расчетные профили средней за макроимпульс плотности тока пучка на разных расстояниях от в.ч.-пушки. Из-за разброса поперечных скоростей инжекции только поперек щелей в сетке профиль плотности тока пучка принимает эллиптическую форму на входе во второй ускоряющий зазор (см. рис. 15а). Высоко-частотная фокусировка приводит к постепенному устранению этого эффекта (см. рис. 15б), но при этом происходит перефокусировка крайних частиц (см. рис. 15в). Этот эффект можно устранить за счет дополнительной магнитной фокусировки

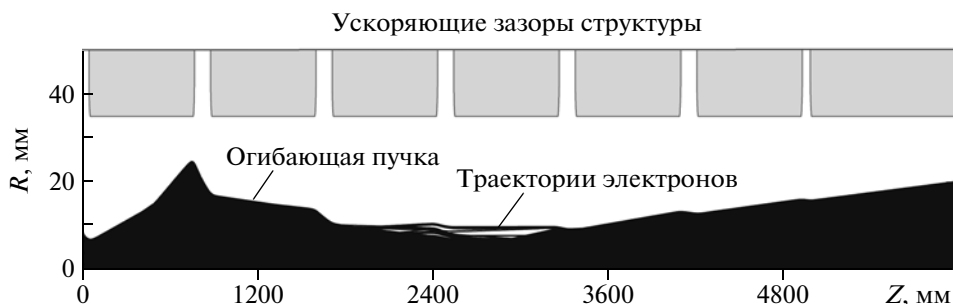


Рис. 14. Траектории электронов в ускоряющей структуре.  $Z$  — длина структуры,  $R$  — радиус.

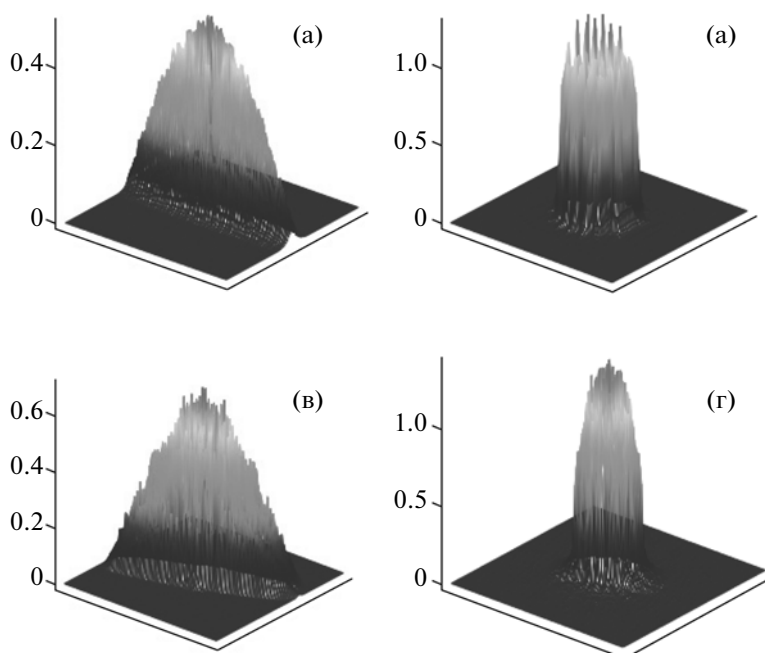


Рис. 15. Профили средней плотности тока пучка: а — на входе во второй ускоряющий зазор; б — на расстоянии 3 м от плоскости катода; в — на выходе из ускоряющей структуры; г — после фокусировки магнитной линзой.

пучка в устройстве развертки пучка по мишени (см. рис. 15г).

### 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ПРОТОТИПА УСКОРИТЕЛЯ

Используемая модульная конструкция в.ч.-системы и ускоряющей структуры обеспечивает возможность сборки ускорителя с заданными параметрами в диапазоне выходных энергий электронов 5–10 МэВ. Для испытания основных узлов и элементов ускорителя был изготовлен прототип ускорителя на энергию электронов 5 МэВ. Блок-схема его приведена на рис. 16.

Высокочастотная система прототипа ускорителя включает в себя ускоряющую структуру, набранную из четырех модулей (см. рис. 2), триод-

ную в.ч.-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  $2\lambda$  на два ввода мощности и суммируется в ускоряющей структуре. Для создания положительной обратной связи автогенератора часть мощности ( $\sim 300$  кВт) отводится из ускоряющей структуры петлей обратной связи и через коаксиальную раздвижную фазосдвигающую линию подается на вход 3 дБ кольцевого моста, где делится на две равные части, которые поступают на входы каскадов на лампах ГИ-50А. Модулятор ускорителя ИЛУ-10М [5] обеспечивает амплитуду импульсного анодного напряжения 30 кВ с длительностью 450 мкс. Частота повторения импульсов до 50 Гц.



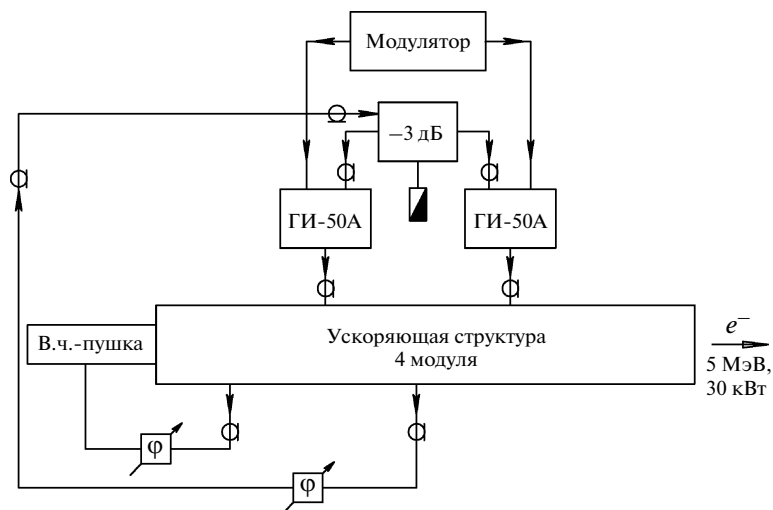


Рис. 16. Блок-схема прототипа ускорителя на энергию 5 МэВ.

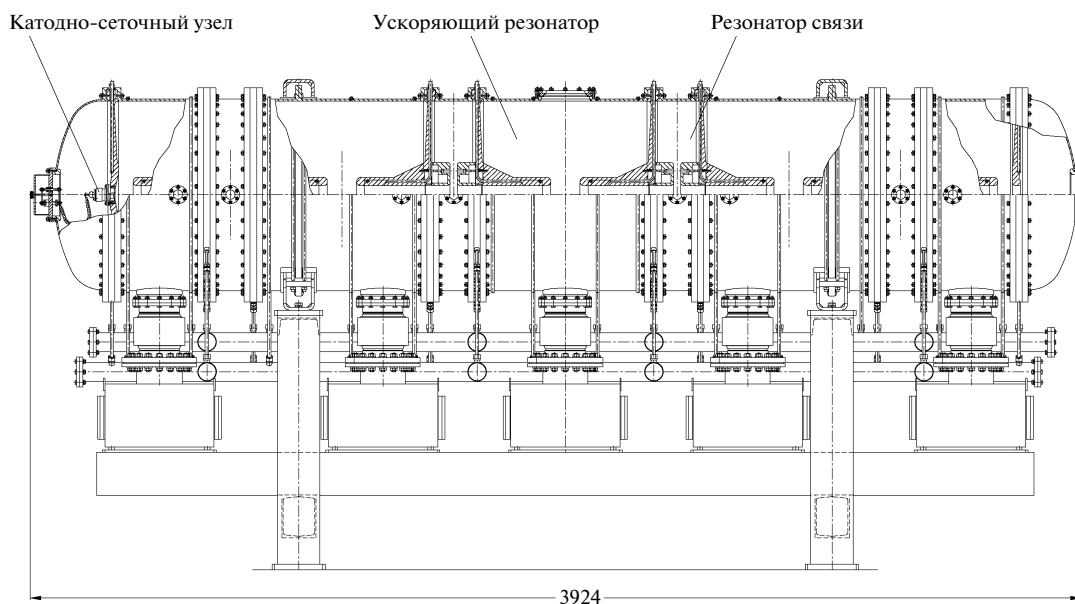


Рис. 17. Общий вид ускоряющей структуры.

Ниже приведены подробные описания основных узлов прототипа ускорителя и результаты измерения их параметров.

### 5.1. Ускоряющая структура

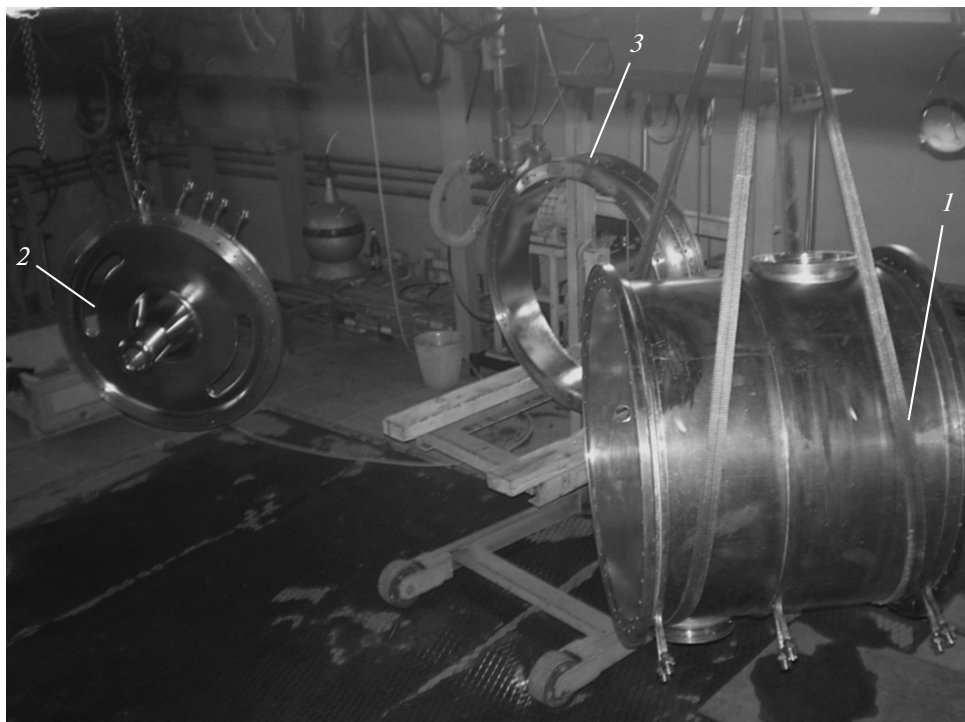
Общий вид ускоряющей структуры прототипа ускорителя представлен на рис. 17. Структура собрана из трех полных и двух половинных (концевых) ускоряющих резонаторов, а также из четырех резонаторов связи.

Полный ускоряющий резонатор представляет собой полуволновой коаксиальный контур (см. рис. 4) и конструктивно состоит из трех частей

(рис. 18): наружной обечайки диаметром 700 мм (1) и двух торцевых стенок с цилиндрическими электродами (2), 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 магниторазрядных насосов, ввода мощности, петли обратной связи и измерительных петель. Резонаторы связи имеют тот же диаметр обечайки (3).

Элементы ускоряющей структуры на начальной стадии изготовления показаны на рис. 19.

На рис. 20 приведена схема охлаждения ускоряющих резонаторов структуры, рассчитанная на



**Рис. 18.** Элементы ускоряющей структуры перед сборкой. 1 – наружная обечайка ускоряющего резонатора; 2 – торцевая стенка с цилиндрическими электродами; 3 – наружная обечайка резонатора связи.



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

режим работы ускорителя 5 МэВ. Из расчетов следует, что большая часть средней тепловой мощности в.ч.-потерь выделяется на наружной поверхности электрода ускоряющего резонатора. Электрод имеет свою водяную ветвь охлаждения в виде медной трубки с внутренним диаметром 8 мм, уложенной внутри электрода вблизи его наружной поверхности. Торцевая стенка резонатора также 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 соединены между собой через индиевые уплотнения и образуют единый вакуумный объем.

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 зако-

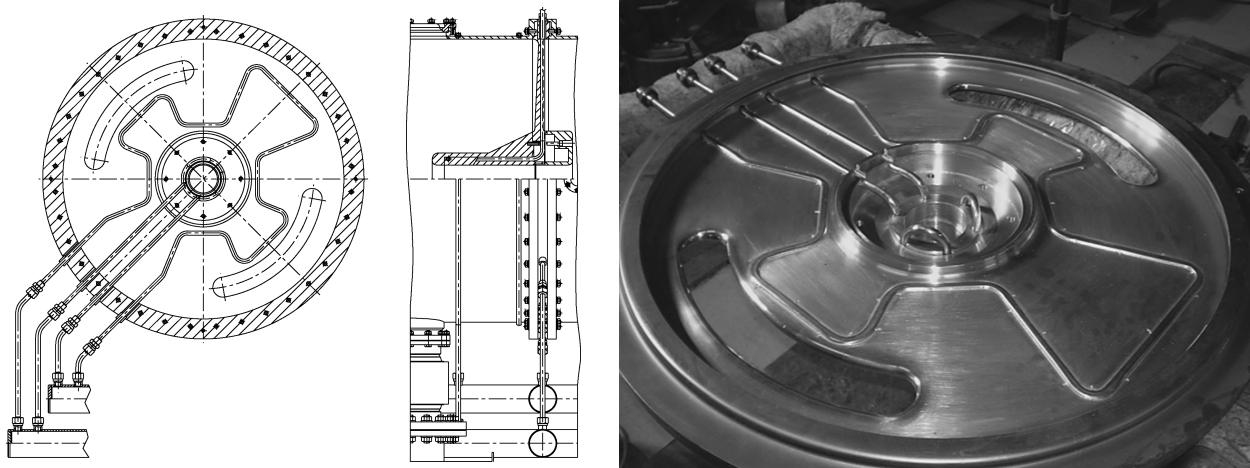


Рис. 20. Система охлаждения коаксиальной части и диска.

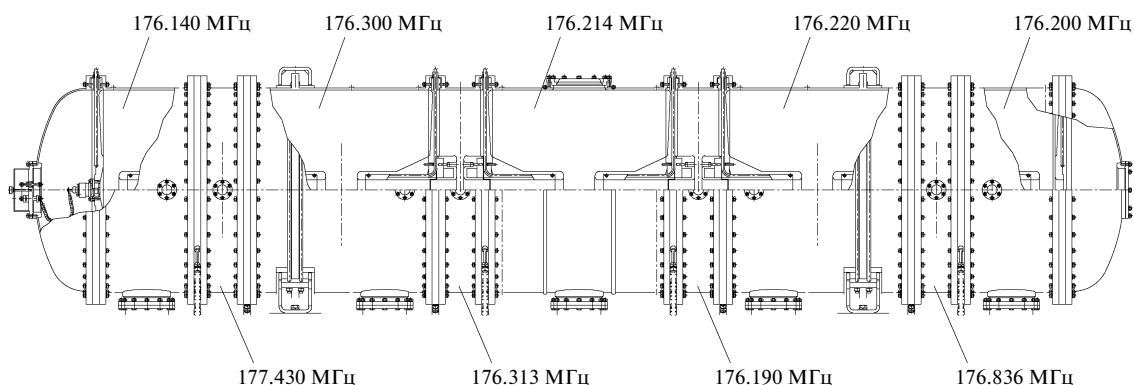


Рис. 21. Общий вид ускоряющей структуры с результатами измерений парциальных частот резонаторов после окончательной сборки.

рачивания зазоров соседних ячеек при помощи медных стержней, вводимых по оси структуры.

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  $\sim 9$  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 (см. значения на общем виде ускоряющей структуры, рис. 21).

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

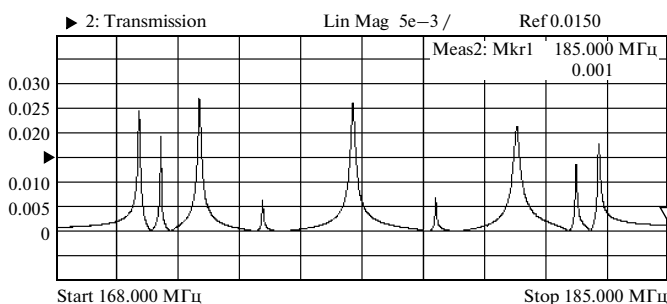


Рис. 22. Частоты связи ускоряющей структуры.

Экспериментально частоты связи ускоряющей структуры были измерены анализатором в.ч.-цепей (рис. 22).

Были проведены измерения относительных величин амплитуд полей рабочей моды в ускоряющих ячейках структуры методом малого возмущения при помощи диэлектрического шарика

Таблица 1.

Характеристики	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

(табл. 1). Измерения с хорошей точностью совпали с результатами 3D-расчетов.

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

Параметры ускоряющей структуры приведены ниже:

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

### 5.2. Высокочастотная пушка

Схема конструкции в.ч.-пушки прототипа ускорителя представлена на рис. 23. Высокочастотная пушка состоит из катода *1*, сетки *2* и анода, роль которого выполняет противоположный электрод ускоряющей полуячейки структуры. Особенностью катодно-сеточного узла является щелевая сетка, обладающая большей прозрачностью по

сравнению с ячеистыми сетками, используемыми в ускорителях серии ИЛУ.

Катодно-сеточный узел триодной пушки размещен в центре передней стенки *3* первой полуячейки 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 ( $\text{LaB}_6$ ). Расстояние между сеткой и катодом составляет 1 мм в нагретом состоянии катода.

Для сужения спектра ускоренных электронов и оптимизации их продольной динамики по токопрохождению на зазор сетка-катод подается дополнительное в.ч.-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*. Высокочастотная мощность поступает из ускоряющей структуры по кабелю 50 Ом через фазосдвигающую линию и направленный ответвитель на узел ввода мощности *8*, который обеспечивает регулировку связи с резонатором в.ч.-пушки. В пучности тока

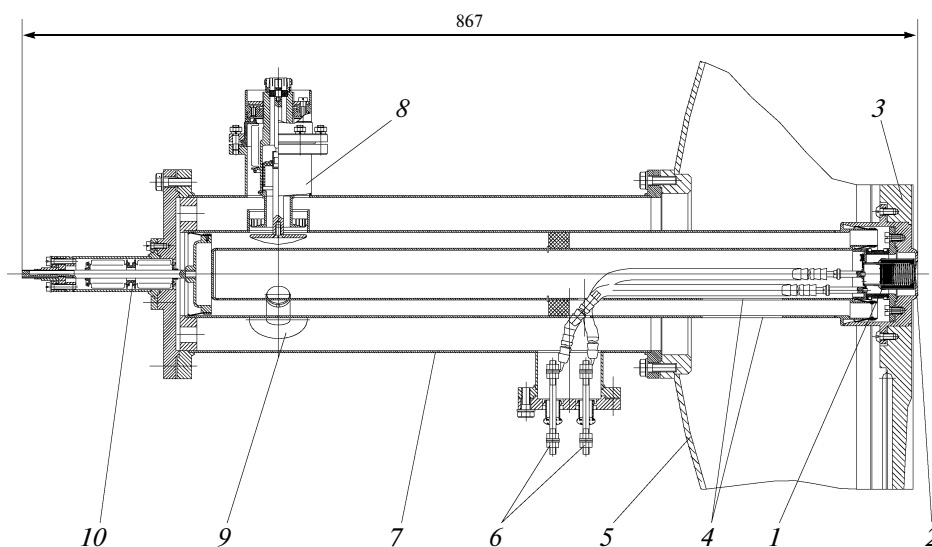


Рис. 23. Конструкция в.ч.-пушки. *1* – катодный узел, *2* – сетка, *3* – передняя стенка ускоряющей структуры, *4* – коаксиальный полуволновой резонатор, *5* – крышка вакуумного бака, *6* – вводы накала, *7* – вакуумный стакан, *8* – узел ввода в.ч.-мощности, *9* – контроль в.ч., *10* – подстройка частоты.

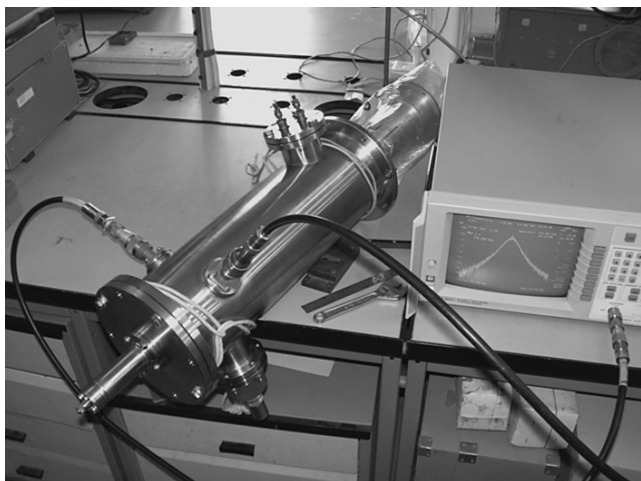


Рис. 24. Общий вид в.ч.-пушки на измерительном стенде.

коаксиального резонатора выведены проводники 6 питания подогревателя катода, по которым подается также и напряжение смещения.

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

Общий вид в.ч.-пушки на измерительном стенде приведен на рис. 24.

### 5.3. Ввод мощности

Ввод мощности (рис. 25) представляет собой низкоомную коаксиальную линию 5 с размерами: внешний диаметр  $D_{\text{внеш}} = 160$  мм, внутренний диаметр  $d_{\text{внутр}} = 100$  мм. Волновое сопротивление этой линии близко к оптимальной величине  $Z_0 = 30$  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 из керамики 22ХС (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 9.3$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta = 7 \cdot 10^{-4}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 13.4$  Вт/(м · К)) с размерами:  $D_{\text{внеш}} = 80$  мм,  $d_{\text{внутр}} = 70$  мм и высота  $h = 60$  мм. Механическая развязка керамики от жесткого коаксиала осуществляется сифоном 3. Предусмотрено также водяное охлаждение 6. Ввод устанавливается на резонаторе ускоряющей структуры. Вакуумное уплотнение осуществляется посредством индиевой проволоки диаметром 1 мм. Высокока-

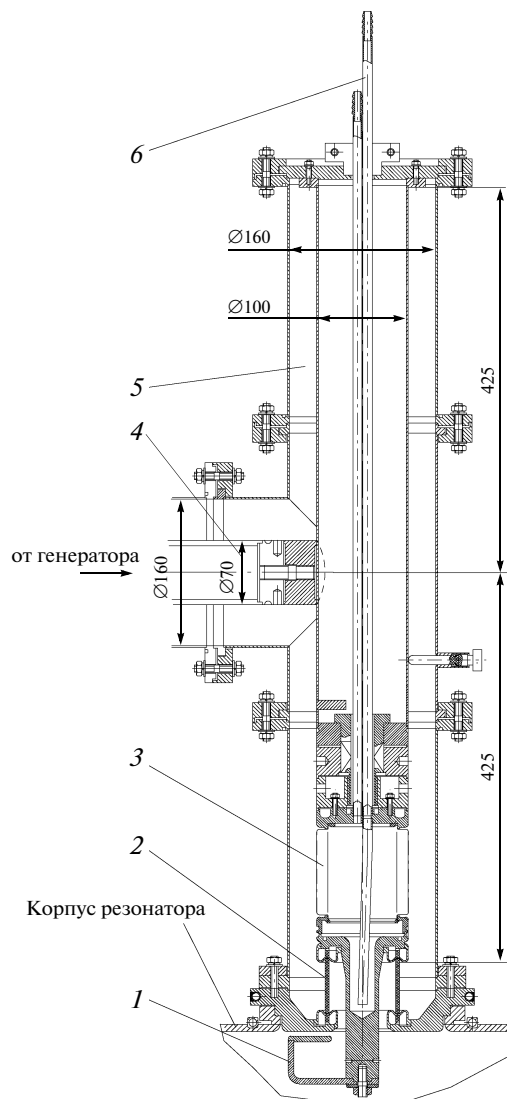


Рис. 25. Конструкция ввода мощности. 1 – петля связи; 2 – цилиндрический изолятор; 3 – сифон; 4 – фидер; 5 – четвертьволновой изолятор; 6 – водяное охлаждение.

стотная мощность подводится фидером 50 Ом 4 в точке, разделяющей коаксиальную часть ввода на четвертьволновой изолятор и четвертьволновой трансформатор. Уровень передаваемой импульсной мощности составляет 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.

### 5.4. Генератор

На рис. 27 показана конструкция каскада в.ч.-генератора на металлокерамическом триоде ГИ-50А. Анодно-сеточный контур 1 представляет собой короткозамкнутую коаксиальную линию

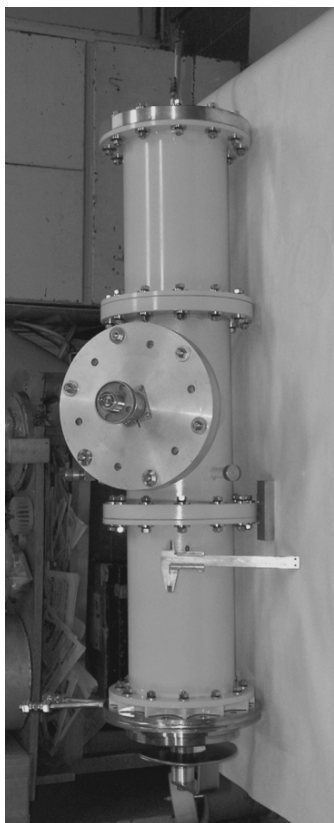


Рис. 26. Общий вид ввода мощности.

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.

Входная цепь генератора – это полуволновой коаксиальный контур 6. К нему 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 110 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 импульсная мощность генератора достигает 2 МВт.

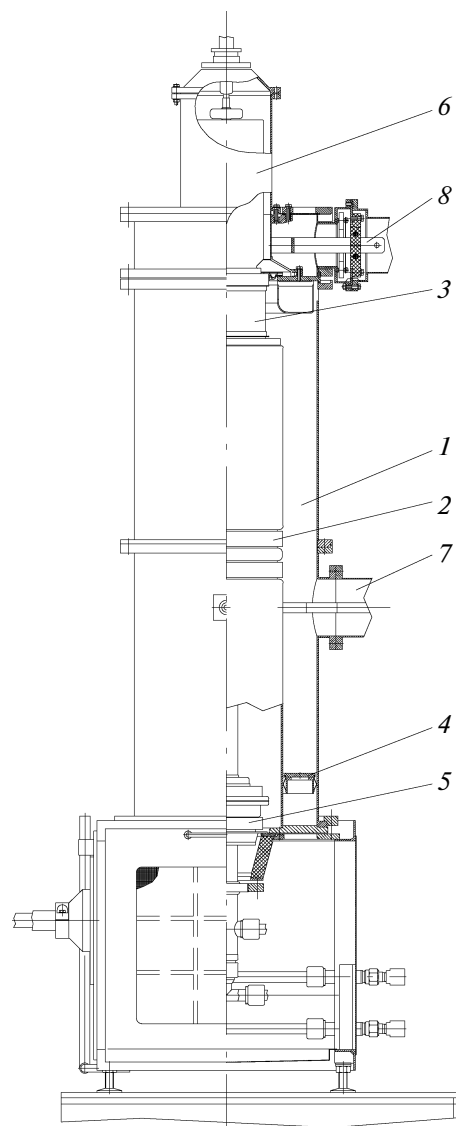


Рис. 27. Конструкция каскада в.ч.-генератора. 1 – анодно-сеточный контур; 2 – анодный разделительный конденсатор; 3 – генераторная лампа ГИ-50А; 4 – закорачивающий плунжер; 5 – анодный LC-фильтр; 6 – катодный контур; 7 – фланец для подключения выходного устройства; 8 – ввод накала генераторной лампы.

Ускоряющая структура возбуждается двумя генераторами. Общий вид генераторов на испытательном стенде показан на рис. 28.

## 6. ИСПЫТАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПРОТОТИПА УСКОРИТЕЛЯ

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

После шестичасовой откачки в ускоряющей структуре достигнут вакуум  $5 \cdot 10^{-8}$  Торр, что является хорошим результатом для непрогревного



Рис. 28. Два генератора с коаксиальными фидерами.

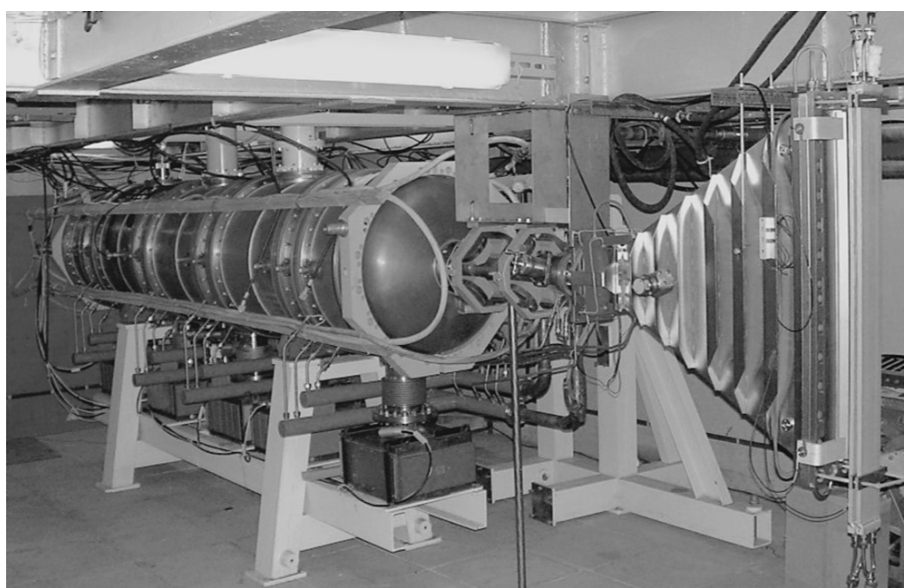


Рис. 29. Ускоряющая структура прототипа с системой развертки в бункере.

объема. При частоте следования импульсов 1–25 Гц потребовалось всего 3 ч тренировки для преодоления высокочастотных разрядов (мультипактора). На четырехмодульной структуре уровень ускоряющего напряжения 7.5 МВ был достигнут в течение 2 ч. Таким образом, структура, состоящая из шести модулей, будет иметь достаточную электрическую прочность для ускорения электронов до энергии 10 МэВ. В табл. 2 приведены расчетные параметры ускорителя ИЛУ-14 на энергию 7.5 и 10 МэВ мощностью 100 кВт.

Для работы ускорителя с токами ~600 мА была оптимизирована связь ускоряющей структуры с передающими фидерами. На рис. 30 приведены результаты измерений амплитуд падающей и отраженной волн при наличии электронного пучка в структуре. Амплитуда отраженной волны близка к нулю (согласованный режим). При постоянной составляющей импульса тока 600 мА и энергии ускоренных электронов 5 МэВ необходима мощность генератора ~4 МВт.

Таблица 2.

Характеристики	Вариант ускорителя ИЛУ-14	
	1	2
Количество генераторов	4 + 1	4 + 1
Энергия, МэВ	10	7.5
Электронный к.п.д., %	68	77
Промышленный к.п.д., %	26	30

### 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 в.ч.-напряжения на катод пушки составляет 80%. При подаче оптимального по амплитуде и фазе в.ч.-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 ускорителя 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 20–30 мм на поверхности фольги выпускного окна.

Средняя мощность пучка определялась двумя способами:

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 инъекции с катода пушки 500 мА), длительности импульса 420 мкс, частоте повторения 33 Гц мощность пучка, измеренная калориметрическим методом, составляла  $33 \pm 2$  кВт. Мощность, рассчитанная по средней энергии и среднему току, равна  $34.2 \pm 1$  кВт, что свидетельствует о хорошем совпадении.

### 6.2. Измерение энергетического спектра пучка

Энергетический спектр ускоренных электронов измеряли с помощью магнитного спектрометра с неоднородным магнитным полем, углом поворота  $148^\circ$  и радиусом поворота 200 мм. Ток пучка фиксировался цилиндром Фарадея, установленным 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 в.ч.-напряжения амплитудой 0.7 кВ показали, что с дополнительным в.ч.-напряжением максимум тока на выходе спектрометра возрастает и смещается в область более высоких энергий. Согласно расчетам, это происходит вследствие инъекции 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 так, чтобы достичь режима установившегося тока пучка на цилиндре Фарадея, и составило ~2 мин.

На рис. 31 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.

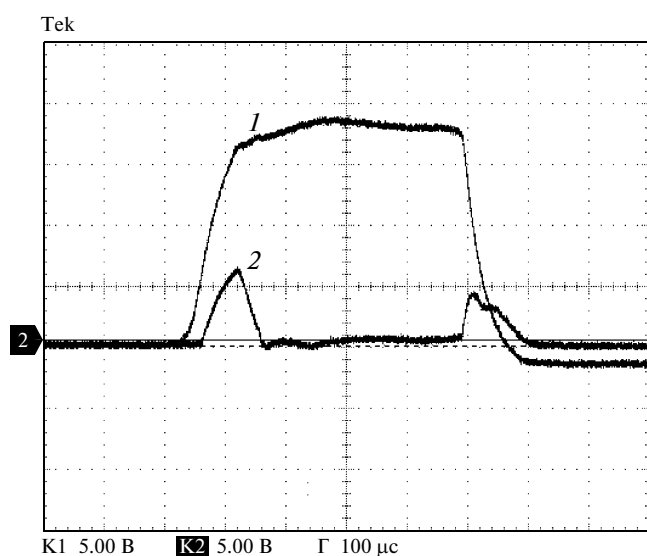


Рис. 30. Амплитуды падающей (1) и отраженной (2) волн при наличии электронного пучка в структуре.





Рис. 31. След пучка на фольге и катодно-сеточный узел (диаметр сетки 20 мм).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный в ИЯФ СО РАН прототип мощного промышленного ускорителя электронов успешно прошел стендовые испытания в импульсном режиме, получены следующие параметры:

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 составила 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 в.ч.-мощность обеспечивается сложением в уско-

ряющей структуре мощности четырех выходных каскадов на лампах ГИ-50А.

Узкий энергетический спектр ускоренных электронов позволяет использовать ускоритель ИЛУ-14 как в электронном режиме, так и в режиме тормозного излучения. Это расширяет область применения ускорителя в промышленности. Дальнейшее увеличение мощности пучка и энергии электронов возможно при наращивании числа модулей в ускоряющей структуре и соответствующем увеличении мощности в.ч.-генератора.

Работа частично поддержана государственным контрактом № 02.740.11.0025 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Авторы выражают благодарность В.Л. Ауслендеру за постановку этой работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lancker M.V., Herer A., Cleland M.R., Jongen Y. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. V. B 151. P. 242.
2. Miller R.B., Loda G., Miller R.C. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. B 211. P. 562.
3. Auslender V.L. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. B 89. P. 46.
4. Ауслендер В.Л., Безуглов В.В., Брызгин А.А. и др. // ПТЭ. 2009. № 3. С. 98.
5. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Ческидов В.Г. и др. // ВАНТ. 2004. № 1. С. 21.
6. Myakishv D., Yakovlev V. // IEEE Particle Accelerator Conf. Rec. 1991. V. 5. P. 3002.
7. Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Шедрин И.С. Диафрагмированные волноводы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 202.
8. Ауслендер В.Л., Макаров И.Г., Острейко Г.Н. и др. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 137.
9. Tiunov M.A., Auslender V.L., Ivanov A.V. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A 558. P. 77.
10. Tiunov M.A., Auslender V.L., Karliner M.M. et al. // Proc. of International Conference on Particle Accelerators PAC'05. Knoxville, Tennessee, USA, 2005. P. 1419; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p05/PAPERS/RPAP015.PDF>