

## Ускорители электронов типа ИЛУ с энергией более 4 МэВ и мощностью более 50 кВт

В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, Г.А. Васильев,  
В.А. Горбунов, М. В. Коробейников, Е. Н. Кокин, С.А. Максимов,  
В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В. М. Радченко, В.О. Ткаченко,  
А.А. Тувик, Б.Л. Факторович  
*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской Академии наук, Россия  
E-mail auslen@inp.nsk.su*

Представлены результаты разработки и испытаний новых вариантов ускорителей электронов серии ИЛУ для промышленного применения с обсуждением перспектив их дальнейшего развития.

### Введение

Начиная с 1970 года, в Институте ядерной физики СО РАН разрабатываются и поставляются в промышленность импульсные линейные высокочастотные ускорители ИЛУ-6 с диапазоном энергии 1.2 – 2.5 МэВ и ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0.8 – 1.5 МэВ, предназначенные для широкого применения в различных технологических процессах и рассчитанные на длительную непрерывную и круглосуточную работу в промышленных условиях. В отличие от широко распространенных высоковольтных ускорителей, генерирующих непрерывный пучок, импульсный характер пучка позволяет легко адаптировать ускорители ИЛУ к технологическим процессам, требующим создания нескольких зон облучения. Например, при облучении полимерной изоляции кабелей и термоусаживаемых трубок применение четырехстороннего облучения позволяет без повышения энергии электронов резко повысить производительность процесса, улучшить качество продукции и расширить номенклатуру обрабатываемых изделий.

Ниже приведены основные параметры производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ, перекрывающих диапазон энергий от 0.5 до 5 МэВ и имеющих мощность пучка до 50 кВт.

Таблица 1. Основные параметры ускорителей типа ИЛУ.

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-6М	ИЛУ-10	ИЛУ-10М
Диапазон энергий, МэВ	0.5 ÷ 1.0	1.2 ÷ 2.5	1.0 ÷ 2.5	3.0 ÷ 5.0	2.5 ÷ 4.0
Мощность пучка (макс), кВт	20	40	20	50	20
Средний ток пучка (max), мА	25	25	20	15	8
Потребляемая мощность (3 × 380 В), кВт	80	150	100	180	100
Потребление воды, л/мин	60	60	60	150	100
Вес, т	1.75	2.2	2.2	2.9	2.5

Основой ускорителей серии ИЛУ является тороидальный резонатор с одним ускоряющим зазором. Электронная пушка располагается на одном из выступающих электродов, формирующих ускоряющий зазор. Возбуждение резонатора осуществляется от однокаскадного автогенератора, реализованного на мощном импульсном триоде ГИ-50А. Отсутствие внешней инжекции и использование схемы с самовозбуждением обеспечивают компактность ускорителя и упрощение конструкции при сохранении достаточно высокого коэффициента преобразования высокочастотной мощности генератора в мощность электронного пучка в рабочем диапазоне энергии.

## 1. Ускоритель ИЛУ-10

Ускоритель ИЛУ-10 является новой разработкой и предназначен в основном для процессов, требующих повышенной энергии электронов и мощности пучка. Общий вид ускорителя показан на рис. 1.

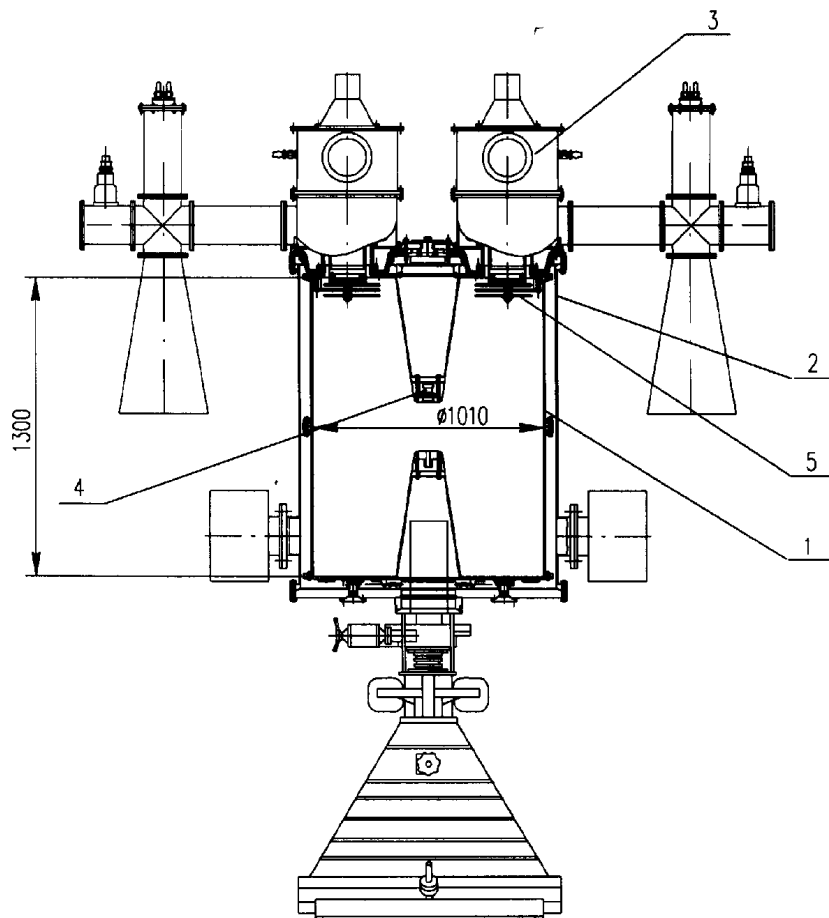


Рис. 1: Ускоритель ИЛУ-10. 1 – резонатор; 2 – вакуумный бак; 3 – высокочастотный генератор; 4 – электронная пушка; 5 – разделительный вакуумный конденсатор.

Габариты этого ускорителя не намного превышают габариты ИЛУ-6. Для повышения мощности пучка на ускорителе ИЛУ-10 устанавливаются два ВЧ-генератора (ускоритель ИЛУ-6 выпускается с одним ВЧ-генератором).

Произведя оптимизацию параметров резонатора ускорителя ИЛУ-6, несколько увеличив его размеры и длину ускоряющего промежутка, удалось снизить высокочастотные потери в резонаторе при сохранении прежней резонансной частоты. Кроме того, расположение двух ВЧ-генераторов симметрично по диаметру на верхней поверхности резонатора обеспечивает подавление резонансного высокочастотного разряда в полости резонатора за счет высоковольтного потенциала на пластинах разделительных вакуумных конденсаторов в анодных цепях генераторов. Это позволило изготовить внешнюю обечайку резонатора единой и таким образом отказаться от подачи напряжения смещения на изолированную нижнюю половину резонатора, как это сделано в ускорителях ИЛУ-6 и ИЛУ-8 [1].

### Основные параметры резонатора:

Резонансная частота — 115 МГц; добротность —  $35 \cdot 10^3$ ; шунтовое сопротивление — 9.6 МОм; высота — 1300 мм; диаметр — 1010 мм; длина ускоряющего зазора — 270 мм.

Эти изменения обеспечили повышение максимальной энергии электронов и максимальной мощности в пучке. При испытаниях ускорителей ИЛУ-10 были достигнуты следующие параметры: энергия электронов 5.5 МэВ при малом токе пучка, энергия 5 МэВ при мощности пучка 50 кВт, энергия 4.5 МэВ при мощности пучка 60 кВт.

## 2. Ускоритель ИЛУ-11

Опыт разработки и эксплуатации импульсных высокочастотных ускорителей типа ИЛУ (ИЛУ-6, ИЛУ-8, ИЛУ-10) показал, что однорезонаторные ускорители с одним ускоряющим зазором могут быть эффективно использованы для ускорения электронов в диапазоне энергий 0.7 ÷ 5 МэВ при мощности электронного пучка 20 ÷ 50 кВт. В области верхней границы указанного диапазона наступают ограничения как по энергии, так и по мощности электронного пучка из-за роста высокочастотных потерь в резонаторе и снижения электрической прочности зазора при возрастающих значениях напряженности электрического поля и запасенной энергии. Дальнейшее повышение энергии электронного пучка требует перехода на использование многозазорных ускоряющих структур, например, цепочек связанных резонаторов.

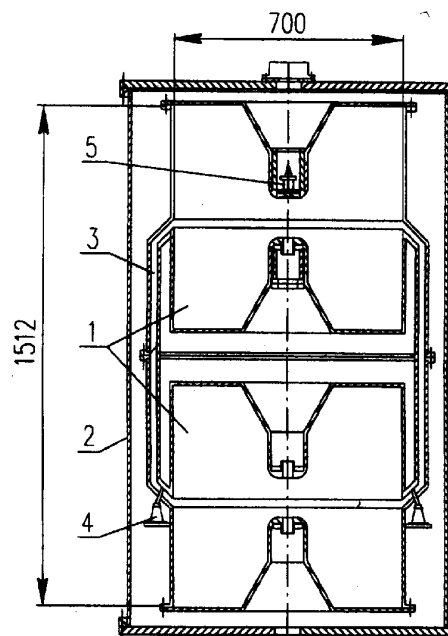


Рис. 2: Ускоритель ИЛУ-10. 1 – резонатор; 2 – вакуумный бак; 3 – высокочастотный генератор; 4 – электронная пушка; 5 – разделительный вакуумный конденсатор.

Наличие базовой модели резонатора ускорителя ИЛУ-8 [2] на энергию до 1 МэВ, отработанного ВЧ-генератора и системы его питания и управления с учетом преемственности конструкции и унификации основных узлов позволило разработать ускоритель ИЛУ-11 для промышленного применения с максимальной энергией электронов до 5 МэВ при сохранении относительной простоты изготовления и наладки.

На рис. 2 изображен общий вид ускорителя. Ускорительная секция, выполненная из двух связанных симметричных тороидальных резонаторов 1, помещена внутрь стального вакуумного бака 2. Связь между резонаторами осуществляется с помощью коаксиальной линии 3 длиной  $\lambda/2$ . Рабочий тип колебаний в ускоряющих резонаторах  $\pi$ . Внутренние половины обоих резонаторов соединены вместе и установлены на опорных изоляторах 4 для изоляции их

от наружного корпуса резонатора. На эти половины через соответствующий вакуумный ввод подается постоянное напряжение смещения — 7 кВ для подавления высокочастотного резонансного разряда и отсоса ионов из ускоряющих зазоров. Опорные изоляторы и ввод напряжения смещения расположены в минимуме электрического высокочастотного поля на нижнем конце коаксиальной линии связи. На верхнем выступе первого резонатора установлена электронная пушка 5 с катодом, изготовленным из гексаборида лантана. Для получения требуемой моноэнергетичности пучка ускоренных электронов инжектор имеет управляющую сетку и снабжен схемой автоматического смещения.

В конструкции ускоряющей структуры предусмотрена взаимная подстройка ускоряющих резонаторов на одинаковую частоту за счет изменения положения внутренней изолированной части относительно наружного корпуса резонатора.

Коэффициент связи между резонаторами зависит от длины коаксиальной линии связи и величины ее волнового сопротивления. При длине линии связи близкой к  $\lambda/2$  обеспечивается вполне удовлетворительное значение коэффициента связи  $3 \div 4\%$ . При этом высокочастотные потери в линии связи составляют не более 12% от общих потерь в стенках резонаторов.

#### Основные параметры ускоряющей структуры:

Резонансная частота — 176 МГц; добротность —  $29 \cdot 10^3$ ; шунтовое сопротивление — 13 МОм; длина каждого ускоряющего зазора — 116 мм.

Возбуждение ускоряющей структуры ускорителя ИЛУ-11 осуществляется от внешнего автогенератора, реализованного на мощном генераторном триоде ГИ-50А, через воздушный коаксиальный фидер и петлю ввода мощности.

#### Основные параметры ускорителя ИЛУ-11:

Максимальная энергия электронов — 5 МэВ; максимальная средняя мощность пучка электронов — 20 кВт (с 1 ВЧ-генератором) и 50 кВт (с 2 ВЧ-генераторами); частота повторения импульсов до 50 Гц; длительность импульса — 0.7 мс.

При последовательном соединении двух аналогичных ускорительных секций посредством соответствующего устройства связи имеется возможность построения ускорителя электронов на энергию 8 – 10 МэВ, или, ограничившись энергией 5 МэВ, при уменьшившихся высокочастотных потерях в ускоряющей структуре и используя более мощный высокочастотный генератор, можно повысить ток инжектора и соответственно увеличить мощность пучка ускоренных электронов до  $100 \div 150$  кВт.

## **Заключение**

Одним из возможных применений ускорителей данного типа является облучение пищевых продуктов (пастеризация), в том числе и с использованием тормозного излучения. Это в значительной степени стимулировало разработку ускорителей ИЛУ-10 и ИЛУ-11.

Наши оценки показывают, что производительность технологической линии по обработке пищевых продуктов при энергии 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт может достигать до 4 тонн продукции в час при дозе облучения 100 крад.

## **Список литературы**

- [1] V.L. Auslender. ILU-type electron accelerators for industrial technologies. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 89 (1994) 46-48.
- [2] V.L. Auslender et al. Compact ILU-type electron accelerators as a base for industrial 4-sided irradiation systems for cable and tubes. Radiation Physics and Chemistry 54 (1999) 609-618.