

# УСКОРЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Ю.П.Вахрушин, В.М.Николаев, А.В.Рябцов, В.Л.Смирнов

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им.Д.В.Ефремова

Ленинград, 188631

## Аннотация

В работе обобщается опыт НИИЭФА по разработке и исследованию ускоряющих структур линейных ускорителей электронов, используемых для решения научных и прикладных задач. В частности, сравниваются возможности структур бегущей и стоячей волны, показана целесообразность использования высокодисперсных диафрагмированных волноводов. Принятые в НИИЭФА конструктивные решения и технология изготовления ускоряющих структур обеспечивают их эффективную работу в широком диапазоне ускоренных токов и при высоких темпах ускорения.

близительно в хронологическом порядке. Подавляющее большинство структур наших ЛУЭ являются структурами бегущей волны — круглыми диафрагмированными волноводами (КДВ). Это объясняется не только относительной простотой их изготовления, но очень часто именно КДВ обеспечивают получение оптимальных характеристик ускорителя в целом. Ниже излагаются общие соображения по применению тех или иных структур в ЛУЭ и их основные конструктивные особенности.

## Сравнение структур бегущей и стоячей волны

## Введение

В работе кратко излагается опыт разработки ускоряющих структур линейных ускорителей электронов (ЛУЭ), накопленный в НИИЭФА. Акцент делается на особенностях принятых и проверенных конструктивных решений, которые не потеряли своей актуальности и в настоящее время. Общее представление о структурах, которые использовались и используются нами при создании ЛУЭ, дают данные, приведенные в табл. I. Структуры в табл. I расположены при-

в линейных высокочастотных ускорителях электронов, работающих в импульсном режиме, с успехом используются структуры как бегущей (БВ), так и стоячей волны (СВ). Результаты исследований и накопленный опыт эксплуатации ускорителей БВ и СВ позволяют сравнить их возможности достаточно обоснованно. Показано I, что максимально возможный прирост энергии электронов в оптимальных структурах СВ и БВ при одинаковой длине структур и при одинаковой мощности СВЧ-гене-

## ПАРАМЕТРЫ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ЛУЭ, РАЗРАБОТАННЫХ В НИИЭФА

№	Тип структуры	Вид колебаний	f ГГц	Тип СВЧ-генератора Р МВт	$l_{гр}, l_{осн}$ м	$a/\lambda$ (основные ячейки)	$R$ (основные ячейки) МОм/м	$W/\lambda$ (1-0) МэВ/м	$E_{прям}$ Ео	Выход ААН ТТВ	Наимен. размер ААН/КЕТ +/-	МОДЕЛЬ УСКОРИТЕЛЯ, НАЗНАЧЕНИЕ	
1	БВ	$\pi/2$	2,8	K.20	4,4	0,14	43	8	1,9	ТТВ	+, -	ЛУЭ-2ГэВ, ЛУЭ-360, ЛУЭ-50 ЛУЭ-25	Ф М
2	БВ	$\pi/2$	2,8	M.1,8	$0,75 \times 1,5$	0,12	55	2,9	-	ТТВ*	-	ЛУЭ-5	М, Р
3	БВ	$\pi/2$	6	M.2	$0,4 \times 0,1$	0,136	71	3	-	ТТВ*	-	ЛУЭ-10-1	А
4	БВ	$\pi/2$	6	-	1	0,136	71	9	-	ТТВ	-	ЛУЭ-10-1	А
5	БВ	$\pi/2$	2,8	K.16	$0,4 \times 4$	0,14	43	6,6	1,9	ТТВ*	+	ЛУЭ-40	Ф
6	БВ	$\pi/2$	2,8	K.16	3	0,12	55	12	1,8	ТТВ*	+	ЛУЭ-40	Ф
7	БВ	$2\pi/3$	1,8	K.16	$0,5 \times 0,9$	0,106	47	7,5	-	ТТВ*	-	ЛУЭ-15-10	Ф, Р
8	БВ	$2\pi/3$	1,8	-	1	0,106	47	7,5	-	ТТВ	+	ЛУЭ-15-10	Ф, Р
9	РБВ	$\pi/2$	2,8	M.1,8	$0,25 \times 0,3$	0,1	60	12	1,7	ТТВ*	-	ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ	М
10	БВ	$2\pi/3$	2,8	K.20	4,4	$0,135 \dots 0,095$	61	12	2,3	ТТВ*	+	ЛУЭ-2 ГэВ	Ф
11	БВ	$\pi/2$	3,2	M.9	$0,75 \times 1,65$	$0,16 \dots 0,1$	62	5,4	2,3	ТТВ*	+	ЛУЭ-8-5, ЛУЭ-8-5 М, ЛУЭ-8-5 В ЛУЭ-8-5 А	Р А
12	БВ	$\pi/2$	3,2	M.9	$0,6 \times 1,7$	$0,11 \times 0,0927$	65	8,8	1,7	ААН	-	ЛУЭ-15-15000 А ЛУЭ-15 М, ЛУЭ-15 М1, ЛУЭ-15 М3	А М
13	БВ	$\pi/2$	3,2	M.9	$0,6 \times 1,7$	$0,11 \times 0,0927$	65	8,8	1,7	ТТВ*	+	ЛУЭ-15 А, ЛУЭ-22 А (с циркуляцией)	А
14	БВ	$\pi/2$	3,2	M.5	$0,2 \times 0,5$	0,0927	65	12	1,6	ААН	-	ЛУЭ-5-500 А	А
15	БВ	$\pi/2$	3,2	M.5	$0,2 \times 0,5$	0,0725	72	17	1,3	ААН	-	ЛУЭ-8-2000 А	А
16	БВ	$\pi/2$	2,8	K.20	2	0,136	49	10	1,7	ТТВ	+	ЛУЭ-120 ИЦ	Ф
17	БВ	$\pi/2$	2,45	K.5	$0,25 \times 0,8$	0,074	62	11	1,3	ААН	-	ЛУЭВ-10-5000 А	А
18	СВ	$\pi/2$	2,45	K.5	$0,15 \times 1,45$	-	75	12,5	3,8	-	-	ЛУЭР-40 М, ЛУЭР-20 М	М
19	БВ	$\pi/2$	2,45	K.5	$0,25 \times 1,65$	0,082	60	9,7	1,5	ААН	+	ЛУЭВ-15-10000 А	А

Условные обозначения: К-кайстрон, М-магнетрон,  $l_{гр}$ -длина группировочного участка структуры,  $l_{осн}$ -длина основного участка структуры с относительной фазовой скоростью волны  $\beta_{ф} \approx 1$ ,  $a/\lambda$ -параметр нагружения диафрагмированного волновода,  $W/\lambda$ -энергия ускоренных электронов при токе 1,  $E_{прям}$ -максимальная напряженность электрического поля на поверхности,  $E_0$ -амплитуда ускоряющего поля, ААН-диафрагмированная альсиферовая нагрузка, ТТВ-трансформатор типа волны съемной конструкции, Ф-физические исследования, М-медицина, Р-радиационная технология, А-дефектоскопия, А-активационный анализ.

ратора с учетом реальных схем СВЧ-питания (наличия или отсутствия развязывающих устройств) оказывается сравнимым при любых значениях токов. Под оптимальной структурой подразумевается структура, обеспечивающая максимальный прирост энергии ускоренных электронов при заданных мощности СВЧ-питания, длине структуры и величине тока частиц.

Для реализации оптимальной структуры стоячей волны достаточно обеспечить оптимальное для заданного тока значение коэффициента связи с волноводным трактом. Для токов, практически применяемых в ускорителях стоячей волны, здесь трудностей нет. Оптимальная же структура бегущей волны в слаботочном режиме (менее 0,1А в импульсе) должна быть высокодисперсной и может быть реализована при длине структуры около одного метра и более. Именно поэтому структуры СВ имеют преимущество при малых длинах и небольшом токе ускоренного пучка. Примером являются широко распространенные медицинские ускорители стоячей волны на энергию 4–6 МэВ с "прямым" пучком. Другим примером, когда предпочтительнее использовать структуру СВ, являются ускорители с циркулирующим электронным пучком. Способность структуры СВ ускорять электроны как в прямом, так и в обратном направлениях позволяет упростить конструкцию тракта возврата пучка. Такая схема ускорителя применялась для терапевтического ускорителя ЛУЭР-40М (см. табл. I, п. 18). В качестве структуры СВ использована структура с внутренними ячейками связи. Она обеспечивает параметры ускоренного пучка, практически мало отличающиеся от параметров для структур с внешними ячейками связи и с шайбами и диафрагмами 2. С другой стороны, структура с внутренними ячейками связи имеет меньшие поперечные размеры, она проще в изготовлении и технологически имеет много общего с изготовлением структур бегущей волны КДВ.

Заметим, что для малых компактных ЛУЭ, применяемых в медицине и дефектоскопии, высокий темп ускорения можно достичь с помощью резонатора бегущей волны 3 (РБВ). Однако практическая реализация такого ускорителя (см. табл. I, п. 9) показала, что дополнительные трудности, связанные с наличием волноводного кольца обратной связи, вряд ли можно считать оправданными. По этой причине в серийных машинах РБВ мы не использовали.

#### Сравнение структур БВ с постоянным импедансом и постоянным градиентом

Как видно из табл. I, нами и применяются структуры как с постоянным импедансом, так и с постоянным градиентом. Эффективность этих структур обычно сравнивается для равных значений суммарного затухания СВЧ-мощности на длине структуры – параметра  $\tilde{\gamma}$ . Известно, что структура с постоянным градиентом при больших  $\tilde{\gamma}$  несколько эффективнее. Однако детальные расчеты структур конкретных ЛУЭ показали, что структуры с постоянным градиентом при ограниченной длине  $l$  (высокий темп ускорения) оказываются нереализуемыми из-за малости параметра  $a/\lambda$  в конечных ячейках. В этих случаях оправданы комбинированные ускоряющие структуры, когда начальная часть является структурой с постоянным (или квази-постоянным) градиентом, а конечная часть –

структурой с постоянным импедансом. Преимущество такой структуры перед структурой с постоянным импедансом невелико, прирост энергии на длине структуры порядка 2 м и при равных ускоряемых токах отличается всего на несколько процентов. Указанные соображения послужили основанием для применения в последних моделях структур с постоянным импедансом, значительно более простых и дешевых в изготовлении.

#### Обрыв импульса тока

Выбор типа колебаний и характера изменения геометрии диафрагмированного волновода мы, как правило, не связываем с "обрывом импульса тока". Многолетняя практика убедительно показала, что предложенная в НИИЭФА 4 конструкция КДВ с радиальными разрезами диафрагм снимает проблему обрыва импульса тока, по крайней мере для машин с малым числом ускоряющих секций. Здесь хотелось бы отметить лишь один момент: наша конструкция (см. рис. 1а), хотя внешне лишь незначительно отличается от предложенной Nunan [5] (см. рис. 1б), но подавляет аксиально-несимметричную волну  $EH_{11}$  на несколько порядков сильнее.

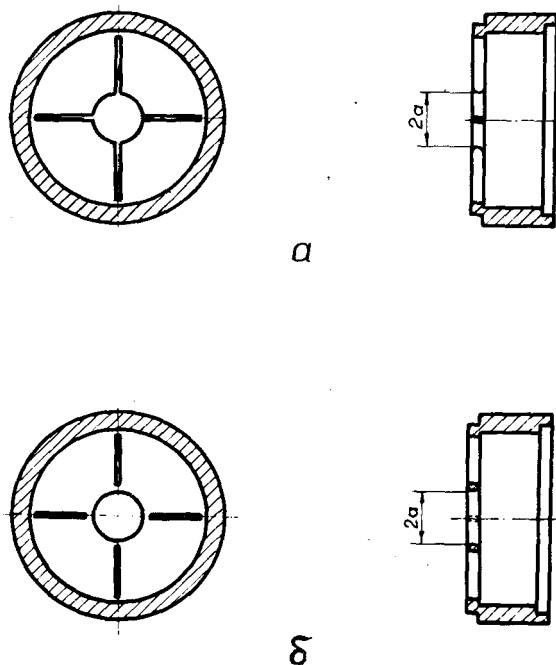


Рис. I. Конструкция диафрагмированного волновода

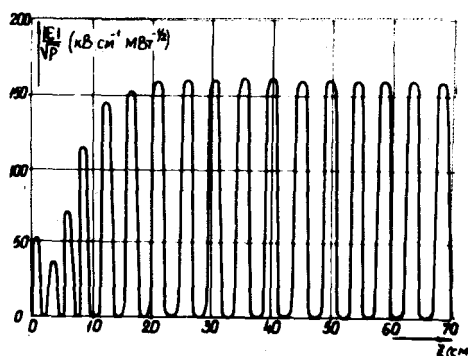
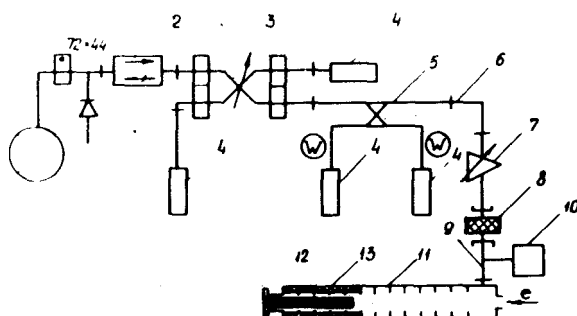
а) НИИЭФА [4], б) Nunan [5].

Первоначальные опасения о понижении электрической прочности КДВ не оправдались, во всяком случае при темпах ускорения, используемых в ЛУЭ (см. табл. I). Эффективность использования КДВ с радиальными разрезами в многосекционных ЛУЭ убедительно показал опыт ХФТИ (г. Харьков). После введения радиальных

разрезов в первые 14 секций ЛУЭ-2 ГэВ неустойчивость пучка на начальной части ускорителя была устранена. На промежуточном выходе с энергией 300 МэВ (после 14 секций) импульсный ток вырос с 10 до 400 мА при полной длительности импульса 2 мкс, средний ток составил 80 мкА [6]. При этом более чем на порядок вырос ток на выходе всей машины.

### Темп ускорения. Электрическая прочность

Рабочий темп ускорения определяется наличием соответствующей СВЧ-мощности и электрической прочностью ускоряющей структуры. Для оценки последней в структурах, изготавливаемых по принятой в НИИЭФА технологии, был выполнен специальный эксперимент.  $\pi/2$ -структура БВ серийного ускорителя дефектоскопа ЛУЭ-5-500Д была испытана в режиме стоячей волны [7]. Блок-схема установки приведена на рис.2а, а распределение поля в закороченном диафрагмированном волноводе, снятое методом малых возмущений, — на рис.2б.



б.

Рис.2. а) Блок-схема испытаний диафрагмированного волновода ЛУЭ-5-500Д в режиме стоячей волны:

1-магнетрон, 2-волноводный ферритовый вентиль, 3-регулируемый волноводный делитель мощности, 4-волноводная нагрузка, 5-направленный ответвитель с индикаторами падающей и отраженной мощности, 6-волноводный изгиб, 7-согласующий узел, 8-кварцевый разделитель.

ное окно, 9-волноводный элемент откачки, 10-вакуумный насос, 11-диафрагмированный волновод, 12-закорачивающий поршень, 13-встроенная диафрагмированная нагрузка.

б) Распределение поля в закороченном диафрагмированном волноводе на частоте  $\pi/2$ -вида колебаний, равной 3,2 ГГц.

Результаты измерений прироста кинетической энергии ускоренных электронов сопоставлялись с данными расчёта динамики частиц, выполненного с использованием экспериментального распределения поля (рис.2б). Максимальные поля в возбуждённых ячейках составили величину 316 кВ/см, а на поверхности скруглений диафрагм — 508 кВ/см, длительность СВЧ-импульса была 3 мкс, а вакуум в структуре не хуже  $1 \cdot 10^{-6}$  торр. Электрические пробои имели место лишь в процессе тренировки. Возбуждение более высоких полей лимитировалось недостаточностью развязки использованных ферритовых вентилях (20 дБ) для устойчивой работы магнетрона. В режиме бегущей волны при повышенных полях испытана структура ускорителя ЛУЭ-8-2000Д. При вакууме  $1 \cdot 10^{-6}$  торр, длительности СВЧ-импульса 3 мкс и СВЧ-мощности на входе 7,4 МВт максимальные ускоряющие поля составили величину 306 кВ/см, а на поверхности скруглений диафрагм — 400 кВ/см. Пробои отсутствовали. Ускоряющие поля вновь измерены по приросту кинетической энергии ускоренных электронов. На наш взгляд, оценка величины полей по энергии ускоренного пучка наиболее достоверна, так как значения полей, рассчитанные по величине СВЧ-мощности, "загоняемой" в структуры, могут быть завышенными, ибо не учитывают расход мощности на ускорение автоэмиссионных электронов. При этом чем больше поля тем больше ошибка.

### Волноводный группирователь

Одним из важнейших компонентов структуры является группирователь. Во всех наших структурах БВ (см. табл. I) он включает входной трансформатор типа волн (ТТВ) и группы волноводных ячеек, размеры которых соответствуют выбранному закону возрастания напряжённости ускоряющего поля и фазовой скорости волны. На основании экспериментального измерения полей и фазовой скорости волны в ТТВ для расчёта динамики частиц нами принята модель:

- 1) поле проникает в запредельный волновод на длину  $0,1 \lambda$ ;
- 2) в первой половине ТТВ (по ходу пучка) имеет место стоячая волна, причём фазовая скорость её меняется от бесконечности до 6с;
- 3) во второй половине ТТВ фазовая скорость волны изменяется от 6с до значения 0,5с, что соответствует фазовой скорости волны в

й р п т

Скорость инжектируемых электронов составляет 0,4с. Значение фазовой скорости и величина ускоряющего поля резко возрастают по длине группирователя (см. рис.3а). В итоге обеспечивается захват до 70% и более инжектируемых частиц, и удаётся ввести электронный сгусток в режим оптимального ускорения ("посадить" на вершину синусоиды) на короткой длине: в ряде случаев  $\sim 2,5 \lambda$ .

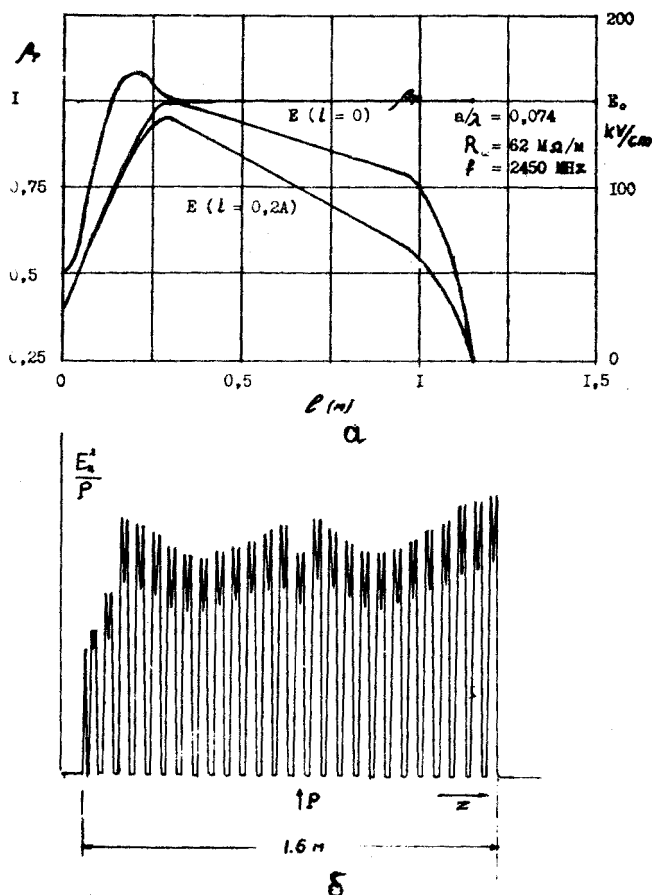


Рис.3. а) изменение фазовой скорости волн  $\beta_{\phi}$  и амплитуды ускоряющего поля основной гармоники  $E$  по длине структуры ЛУЭВ-10-5000Д, б) распределение величины  $\frac{E^2}{P^2}$  в структуре стоячей волны ускорителя ЛУЭР-40М.

С этой же целью в конце группирователя вводится участок с фазовой скоростью, превышающей скорость света.

#### Выходные устройства

Ускоряющие структуры БВ заканчиваются либо выходным ТТВ, либо встроенной диафрагмированной альсиферовой нагрузкой (ДАН). При этом все структуры, включающие группирователи (см. табл.1), заканчиваются либо ДАН, либо ТТВ в съёмном исполнении, что упрощает установку фокусирующей системы. Съёмный ТТВ присоединяется к диафрагмированному волноводу через специальную диафрагму с двухсторонним индиевым покрытием контактной поверхности.

В ряде случаев (многосекционные машины) входной и выходной ТТВ имеют дополнительный волновод, расположенный диаметрально противоположно основному подводному волноводу. Таким образом, значительно исключается асимметричная асимметрия поля в ТТВ. ДАН представляют собой обычные ячейки, на внутреннюю цилиндрическую поверхность которых нанесено альсиферовое покрытие в виде кольцевого пояса таким образом, что рассеиваемая СВЧ-

мощность в расчёте на одну ячейку оказывается примерно одинаковой.

#### Структуры новой серии ЛУЭ

В настоящее время в НИИЭФА разработана новая серия ЛУЭ для промышленности и медицины. Она включает унифицированные структуры бегущей волны (4 модификации, в том числе 3 высокодисперсные) и две структуры стоячей волны с внутренними ячейками связи.

Источником СВЧ-мощности для ЛУЭ новой серии служит низкопотенциальный (анодное напряжение не превышает 55 кВ) многолучевой усилительный клистрон на 5 МВт в импульсе и среднюю мощность 5 и 25 кВт, рабочая частота 2450 МГц. Малое анодное напряжение позволило сократить габариты и массу питающих клистрон устройств. Для фокусировки в клистроне применена периодическая система из постоянных магнитов.

Изготовлены и испытаны ускоряющие структуры двух моделей новой серии. На рис.3а приведены основные характеристики структуры бегущей волны дефектоскопа ЛУЭВ-10-5000Д, а на рис.3б — экспериментально измеренное распределение поля в структуре стоячей волны с внутренними ячейками связи для ускорителя ЛУЭР-40М. Обе структуры прошли стендовые испытания и на них получены проектные параметры.

#### Литература

1. Vakhrushin Yu.P., Nikolaev V.M., Ryabtsov A.V., Smirnov V.L. Use of High Dispersion Accelerating Waveguides in Linear Electron Accelerators.-Proc. of the 1984 Linear Accelerator Conf.-Seehein, May 7-11, 1984, p.174.
2. Вахрушин Ю.П., Ворогушин М.Ф., Николаев В.М., Рябцов А.В., Свистунов Ю.А., Смирнов В.Л. Ускоряющая структура линейного ускорителя для медицины модели ЛУЭР-40М.- Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып.2 (14), 1983, с.51.
3. Баранов Ю.А., Беломоева Р.В., Левин В.М., Николаев В.М., Прудников И.А., Румянцев Б.В., Рябцов А.В., Смирнов В.Л. Компактный линейный ускоритель электронов для лучевой терапии и дефектоскопии.-Электрофизическая аппаратура. Сб. статей, вып.15.-М.: Атомиздат, 1977, с.11.
4. Levin V.M., Smirnov V.L., Fomin L.P. On the Possibility of Large Pulse Currents in Linear Electron Accelerators Using Homogeneous Structures.-Proc. of the 6-th Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge, Mass., 1967, p.A-39.
5. Numan C.S. Accelérateur Lineaire. Brevet de France, No 1316967, N05h 9/00, 1962.
6. Вишняков В.А., Довбня А.Н., Шендрик В.А. К повышению интенсивности пучка многосекционного ускорителя электронов.-Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып. 2(11), 1982, с.48.

7. Волчков О.В., Гусев Е.К., Изотов А.Н.,  
Прудников И.А., Рябцов А.В., Свистунов Ю.  
А., Смирнов В.Л., Тронов Б.Н., Терентье-  
ев В.В. Испытание диафрагмированных вол-  
новодов ЛУЭ при больших градиентах полей.  
-Труды VIII Всесоюзного совещания по ус-  
корителям заряженных частиц, Протвино,  
19-21 октября 1982, т. II, с.22.