

# УСКОРЕНИЕ ИОНОВ $\text{Xe}^{2+}$ В ПЕРВОЙ СЕКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИНЕРЦИОННОГО УТС НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В.С.Артемов, В.А.Баталин, Е.Н.Данильцев, А.Ю.Дядин, А.Б.Зарубин, Д.Д.Иосселиани, И.М.Капчинский, А.М.Козодаев, А.Р.Курс, В.В.Кушин, Н.В.Лазарев, И.М.Липкин, И.О.Паршин, С.В.Плотников, В.С.Скачков, С.Б.Угаров, В.Г.Шевченко

Институт теоретической и экспериментальной физики  
Москва, 117259

## Аннотация

Приведена возможная структурная схема и даны ориентировочные параметры резонансного линейного ускорителя для установки инерционного термоядерного синтеза на ионах  $\text{Bi}^{2+}$ , ускоренных до энергии 20 ГэВ/ядро при токе пучка 500 мА и длительности пучка 2 мс, рассмотрены возможные конструкции ионных источников, а также эффекты, приводящие к росту фазового объема пучка, и даны соответствующие оценки.

В ИТЭФ создан прототип первой секции начальной части линейного ускорителя (ЛУ) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) на частоте 6.2 МГц для ускорения ионов  $\text{Bi}^{2+}$  до 2.5 МэВ. Обсуждаются расчетные параметры этой секции с сосредоточенными индуктивностями, результаты ее запуска на ионах  $\text{Xe}^{2+}$ , ускоренных от энергии 130 кэВ до 1.35 МэВ, при импульсном токе пучка 5 мА. Сообщается о достижении напряженности ускоряющего поля, достаточной для ускорения ионов  $\text{Bi}^{2+}$ .

В ИТЭФ в течение ряда лет ведутся исследования возможности создания энергетической термоядерной установки с возбуждением инерционной реакции синтеза пучками тяжелых ионов. В схеме драйвера предполагается использование резонансного линейного ускорителя с дальнейшей системой накопления, компрессии и транспортировки пучка  $\text{Bi}^{2+}$ .

По оценкам, выполненным в ИТЭФ, ЛУ драйвера должен обеспечить возможность высадить на мишень пучки ионов висмута с энергией 20 ГэВ при суммарной энергии пучков 9 МДж и мощности порядка 400 ТВт. Эти условия могут быть выполнены при следующих параметрах ЛУ:

1. Энергия ионов  $\text{Bi}^{2+}$  20 ГэВ
2. Ток пучка в импульсе 500 мА
3. Длительность импульса 2 мс
4. Разброс частиц по импульсам  $+3 \cdot 10^{-5}$
5. Нормализованный эмиттанс пучка 0,2 см. мрад.

Электрическая мощность, потребляемая ЛУ в режиме работы драйвера на четыре термоядерных реактора, составляет 810 МВт, КПД линейного ускорителя — около 50%.

Схема построения ЛУ и характеристики составляющих ее частей приведены в работе <sup>3</sup>. В соответствии с этой схемой на начальном этапе ускорение ведется в 16 каналах с поэтапным сложением пучков. Основные параметры секций ЛУ приведены ниже (см. <sup>3</sup>).

Предполагается, что в каждом из 16 каналов инжекции будет получен пучок ионов  $\text{Bi}^{2+}$  с током 50 мА при энергии 200 кэВ. Начальное ускорение до энергии 10 МэВ будет осуществляться в секциях с ПОКФ на частоте около 6 МГц. Согласно оценкам, в каждом канале первой секции в режим ускорения будет захватываться пучок со средним током в импульсе более 30 мА. В основной части будет ускоряться пучок со средним током в импульсе не ме-

нее 500 мА. В ИТЭФ сооружен и запущен один канал первой секции. Ниже дано описание экспериментальной установки и некоторые результаты работы.

Инжектор тяжелых ионов для ЛУ представляет собой ускоритель прямого действия с секционированной трубкой, рассчитанной на напряжение до 200 кВ. Для инжектора разработаны два типа источников тяжелых ионов (ИТИ): дуоплазмотрон и дуопитатрон. Оба ИТИ могут работать с рабочим веществом в виде газа или в виде паров металла, в частности висмута. Отличительными особенностями разработанных ИТИ являются холодный катод в виде плоского медного цилиндра и выпускной импульсный клапан 5, который перекрывает отверстие эмиссии ИТИ и открывается только на короткое время для выпуска струи плазмы из разрядной камеры. В дуопитатроне используется два клапана, которые разделяют объемы двух разрядных камер этого ИТИ по вакууму.

Опробование структуры с ПОКФ на первом этапе работ было решено проводить с пучком ионов  $\text{Xe}^{2+}$ . Генерация этих ионов была осуществлена дуоплазмотроном, рассчитанным на использование в качестве рабочего вещества благородного газа. Для обеспечения возможности производить на выходе инжектора время-пролетный анализ пучка в ионно-оптическую систему источника была введена запирающая сетка. Высоковольтные импульсы с короткими фронтами формировали импульсы ионного тока длительностью от 0,5 до 10 мкс. Идентификация зарядового состояния ионов производилась по времени пролета базового расстояния между индукционным датчиком и цилиндром Фарадея. Составляющие пучка  $\text{Xe}^{+}$ ,  $\text{Xe}^{2+}$  и  $\text{Xe}^{3+}$  на выходе инжектора напряжением 65 кВ (для висмута 100 кВ) надежно разрешались.

Известно, что при увеличении среднего тока ионного пучка электрическая прочность ускоряющей трубки в электростатическом инжекторе существенно снижается. Ограничение по напряжению обуславливает столь низкую скорость малозарядных тяжелых ионов на входе ЛУ, что магнитная фокусировка становится полностью непригодной. Из всех возможных методов электрической фокусировки наиболее эффективной является пространственно-однородная квадрупольная фокусировка.

По нашим оценкам для уверенного обеспечения величины ускоренного тока  $\text{Bi}^{2+}$  30–40 мА при фазовой плотности пучка  $j = 0,3 \text{ А/см.мрад}$  рабочую частоту ускоряющей структуры следует выбирать около 6 МГц. Из представленных ниже расчетных параметров ЛУ ИТЭФ можно видеть, что частота ускоряющего поля в 1 секции с ПОКФ на сосредоточенных резонансных элементах <sup>6</sup> выбрана весьма низкой (6,19 МГц), что позволяет относительно легко оптимизировать режим фокусировки и одновременно допускать инжекцию ионов  $\text{Bi}^{2+}$  при напряжении всего 100 кВ.

# Основные параметры ЛУ

Параметры	Начальная часть				Основная часть
	Секция I	Секция II	Секция III	Секция IV	
Число каналов	16	8	4	2	1
Частота ускоряющего поля	6,19 МГц	12,39 МГц	24,78 МГц	99,10 МГц	198,2 МГц
Высокочастотная структура	ВЧ спирали	ВЧ спирали	Видерое	Альварец	Альварец
Фокусирующая система	ПОКФ	ПОКФ	Магнитные квадруполь	Магнитные квадруполь	Магнитные квадруполь
Энергия ионов на входе	200 кэВ	10 МэВ	50 МэВ	600 МэВ	2,5 ГэВ
Энергия ионов на выходе	10 МэВ	50 МэВ	600 МэВ	2,5 ГэВ	20 ГэВ
Средний ток пучка в канале	32 мА	64 мА	128 мА	256 мА	512 мА
Длина секции	16,4 м	62,7 м	360 м	360 м	3296 м

Первая секция начальной части состоит из трех участков: формирования, группировки и регулярного ускорения. В второй секции с ПОКФ ускорение осуществляется при постоянной равновесной фазе. Жесткость квадрупольного канала пропорциональна длине волны ускоряющего поля  $\lambda$ . Для участка регулярного ускорения I секции с ПОКФ  $K^2 = 2,19$ , а фактор дефокусировки  $\gamma_s = 0,092$ . Это приводит к оптимальным значениям частот поперечных колебаний.

Что касается вопроса межэлектродной электрической прочности, то по данным работы [8], найденные при измерениях на частоте 6 МГц пробойные значения близки к значениям, полученным при испытаниях вакуумных промежутков в диапазоне частот 25–150 МГц. При этом пробой для электродов из меди, алюминия и дюралюминия начинались примерно при одних и тех же напряженностях электрического поля  $E_s > 200$  кВ/см, что в 2,5 раза выше значений, соответствующих критерию Килпатрика для частоты 6,2 МГц. Для электродов из нержавеющей стали  $E_s$  оказалось в 1,5 раза выше, а для титановых в 3–4 раза выше, чем у медных. ВЧ-тренировка медных электродов позволила повысить  $E_s$  до 500 кВ/см и выше, при титановых электродах эффект тренировки полностью отсутствует, и повторно достичь величины  $E_{smax}$  после первого пробоя уже не удается.

Разработка ускоряющей структуры со столь низкой рабочей частотой натолкнулась на ряд трудностей. Использование ускоряющей структуры со встречными вибраторами [9] оказалось невозможным из-за недостаточной их жесткости, так как при  $\lambda = 50$  м четвертьволновые вибраторы при закреплении с одного конца должны иметь длину 5–6 м, а полуволновые вибраторы с закреплением с двух сторон – 10–12 м. Введение в структуру дополнительных опор в виде коаксиальных шлейфов, как это часто делается в резонаторах типа Видероз, также неприемлемо из-за их большой длины. В связи с этим была проверена возможность выполнить шлейфы в виде сосредоточенных индуктивностей (плоских или цилиндрических спиралей).

Резонансные структуры обеих секций представляют собой промодулированные по заданному закону четырехпроводные линии с погонной емкостью около 80 пФ/м, закрепленные на спиральных из медных трубок (рис.1). Эти индуктивные опоры конструктивно выполнены в виде симметричной трехлучевой звезды, что обеспе-

чивает взаимную компенсацию возникающих в спиральных пондеромоторных сил. Подавление рас-

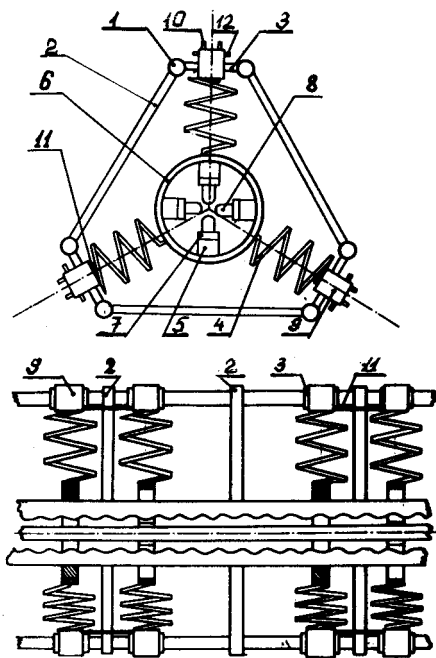


Рис.1. Схематические поперечный (а) и продольный (б) разрезы секции. 1 – продольная рама, 2 – треугольная рама, 3 – платформа, 4 – спираль, 5 – балка, 6 – кольцевая перемычка, 7 – юстировочный механизм, 8 – профилированные электроды, 9 – каретка, 10,12 – болты, 11 – контактное соединение.

чивающих усилий существенно ввиду близости частоты механического резонанса структуры и предполагаемой частоты повторения ЛУ- драйвера. На изготовленном участке I секции длиной 6 м и диаметром 1,2 м (рис.2) проведены комплексные испытания. На резонансной частоте 6,19 МГц структура имеет добротность 820, шунтовое сопротивление 20 кОм. Механические параметры: жесткость – 1500 Н/мм, частота

9 Гц, добротность 400. После откачки до рабочего вакуума  $5 \cdot 10^{-6}$  тор был произведен ввод ВЧ мощности, причем напряжение между электродами при расчетной для ускоренных ионов  $\text{Bi}^{2+}$  величине 190 кВ достигало без пробоев 210 кВ.

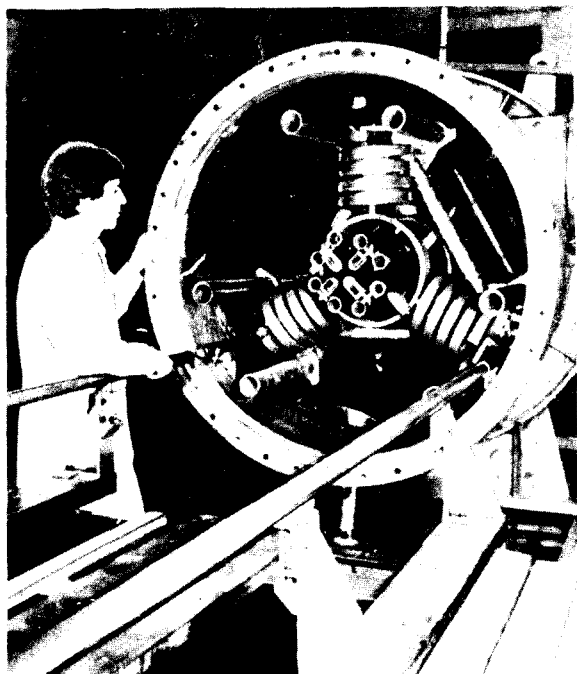


Рис.2. Общий вид ускоряющей структуры в вакуумном кожухе

При запуске ионооптическая система источника настраивалась таким образом, чтобы кроссовер пучка ионов  $\text{Xe}^{2+}$  находился у входа в согласующий канал длиной 2 м, который содержал две электростатические линзы и два корректора. В первых экспериментах из выходного тока инжектора до входа в секцию с ПОКФ было проведено 10 мА ионов  $\text{Xe}^{2+}$ . После превышения порогового уровня ВЧ поля основная часть ( $> 90\%$ ) пика ионов  $\text{Xe}^{2+}$ , измеряемого на выходе секции, переместилось во времени на 5 мкс, что соответствует ускорению этих ионов до расчетной энергии 1,35 МэВ (рис.3).

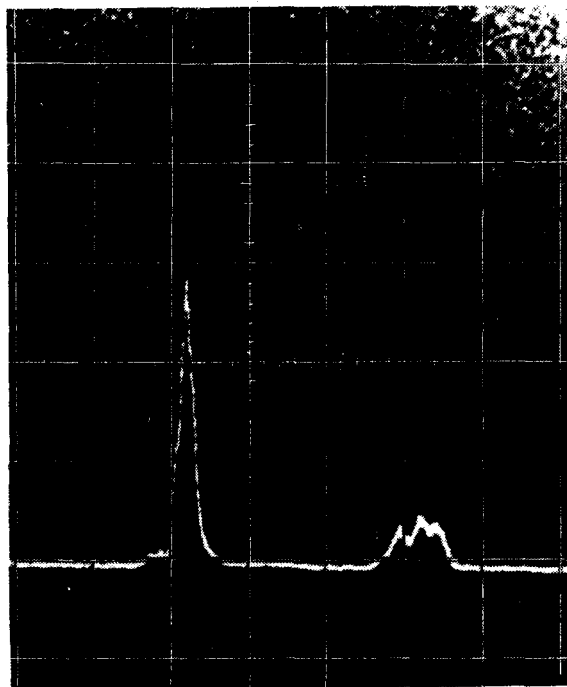
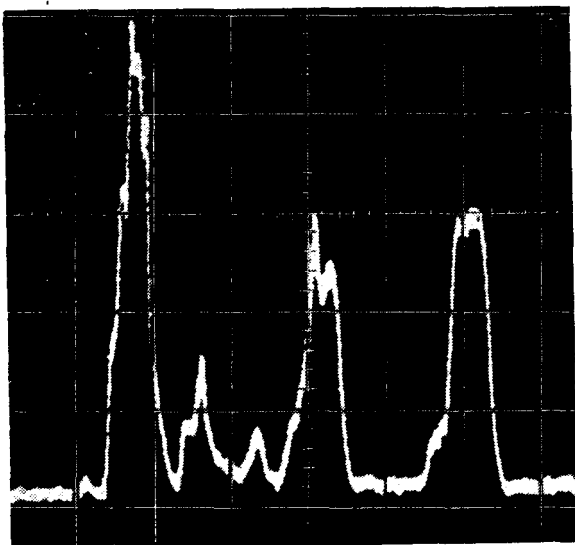


Рис.3. Осциллограммы ускоренного и неускоренного пучков  $\text{Xe}^{2+}$  на выходе секции.

Величина выходного тока составила около 7 мА, то есть захват оказался близким к 10%. Дальнейшее изучение режимов работы структуры с ПОКФ длиной 6 м позволит уточнить параметры второй части структуры на частоте 6,2 МГц, а также последующих частей прототипа ускорителя-драйвера.

#### Литература

1. Зенкевич П.Р., Капчинский И.М., Кошкарёв Д.Г. Ускорительный комплекс для инерционного термоядерного синтеза на тяжелых ионах. Препринт ИТЭФ-143, М., 1980.
2. Зенкевич П.Р., Имшенник В.С., Капчинский И.М., Кошкарёв Д.Г., Шевченко В.Г. Исследования в ИТЭФ по применению тяжелоионных пучков для УТС. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983, т.1, с.32.
3. Капчинский И.М., Кушин В.В., Данильцев Е.Н. Линейные ускорители тяжелых малозарядных ионов для инерционного термоядерного синтеза. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып.2 (23), М., 1985, с.10.
4. Баталин В.А., Коломиец А.А., Кондратьев Б.К., Куйбыда Р.П. Ионный источник дуоплазмотронного типа с холодным катодом. IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-23, No.2, 1976, p.1097.
5. Баталин В.А., Коломиец А.А., Кондратьев Б.К. Эксплуатационные характеристики выпускного импульсного клапана для источника протонов линейного ускорителя И-2. Препринт ИТЭФ-97, М., 1979.
6. Данильцев Е.Н., Дядин А.Ю., Зарубин А.Б., Капчинский И.М., Кушин В.В., Нестеров Н.А., Паршин И.О., Угаров С.Б. Ускоряющая структура с ПОКФ для тяжелых ионов на частоте 6 МГц. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985, т.1, с.218.

7. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей.-М., Энергоиздат, 1982, с.140.

8. Зарубин А.Б., Иосселиани Д.Д., Кушин В.В. Исследование электрической прочности сферических электродов на частоте 6 МГц. Препринт ИТЭФ-188,- М., 1984.

9. Müller R.W., Kopf U., Bolle J., Aral S., Spadtke P. Experimental results with a very-heavy-ion RFQ accelerating structure at GSI, GSI-1-84-11, 1984, p.77.