

Подготовка и физический пуск протонного ускорителя RFQ на повышенный средний ток

В.С.Артемов, Р.М.Венгров, А.М.Вишневецкий, К.В.Вознесенский,
И.А.Воробьев, А.В.Козлов, А.М.Козодаев, В.А.Кошелев, Р.П.Куйбида,
Н.В.Лазарев, Д.А.Лякин, Ю.Г.Орлов, В.И.Першин, В.К.Плотников,
А.М.Раскопин, Ю.Б.Стасевич, О.В.Шведов, С.Г.Ярамышев
ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

На сооруженном одним из первых в мире и запущенном ранее в ИТЭФ предварительном варианте ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и “лопастной” конструкцией электродов (RFQ-1) [1] была экспериментально подтверждена правильность заложенных в него основных теоретических представлений и использовавшихся расчетов. Конструктивно ускоритель включал в себя 4-проводную линию, модулированную в продольном направлении по синусоидальному закону и запитываемую от 4-камерного Н-резонатора, помещенного в вакуумный кожух (рис. 1). Н-резонатор общей длиной 4,7 м был разбит на 8 секций длиной по $\sim 0,6$ м. Такая конструкция привлекала возможностью изготовления секций на базе легко доступного (по длине обрабатываемых деталей) станочного парка, отдельным и независимым решением вопросов вакуумной плотности (кожух) и задач юстировки канала и настройки полей (резонатор), и обеспечила относительно быстрое изготовление ускорителя и получение физических результатов. При выходной энергии 3 МэВ на выходе установки был получен импульсный ток пучка ~ 250 мА [2]. В диапазоне токов от 0 до 100 мА потери частиц практически отсутствовали, доля ускоренных частиц в выходном пучке составляла 95%.

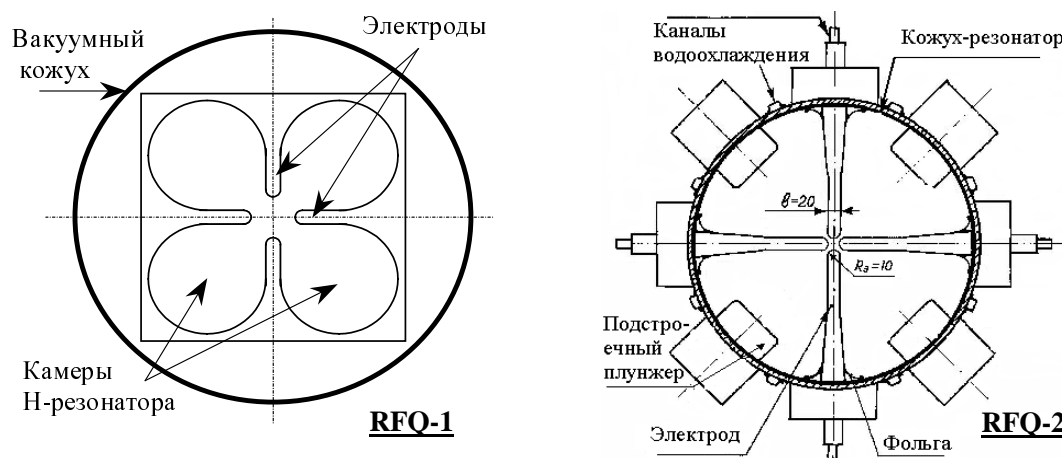


Рис. 1: Поперечное сечение ускорителей RFQ1 и RFQ2.

Одновременно был выявлен значительный рост эмиттанса и существенное увеличение потерь частиц при токах 100 мА. Многосекционность резонатора и недостаточная жесткость его конструкции способствовали появлению со временем асимметрии и локальных возмущений поля в апертурном канале, что приводило к увеличению потерь частиц. Из-за наличия щелей между секциями, ВЧ-поле проникало в объем между резонатором и кожухом, где его напряженность достигала 8–12% от уровня в резонаторе, что приводило к

искрениям, мультипакторным явлениям и в результате — к обугливанию изоляции проложенных в этом объеме сигнальных кабелей, миграции пылевых продуктов обугливания в апертурный канал и резкому снижению электрической прочности структуры. Кроме того, недостаточная эффективность теплоотвода от резонатора исключала возможность ускорения среднего тока 500 мкА, который потребуется от секции RFQ при ее работе в качестве начальной части в составе ускорителя-драйвера ИСТРА-36 [3].

С целью уменьшения или исключения отмеченных недостатков разработан ускоритель RFQ-2, в котором апертурный канал рассчитан с учетом полученного опыта и новых предложений, а ВЧ-резонатор и вакуумный кожух конструктивно объединены в единый триметаллический корпус (рис.1). Основные расчетные параметры ускорителя RFQ-2:

Энергия протонов на выходе	3,03 МэВ	Импульсный ток пучка до	150-200 мА
Энергия инъекции	81,1 кэВ	Средний ток пучка	0,5 мА.
Частота ВЧ-поля	148,5 МГц	Возможн. средн. ток пучка	5 мА
Длительность ВЧ-импульсов	300 мкс	Внутр. диаметр резонатора	449 мм
Частота повтор. импульсов	25 Гц	Общая длина канала	4,5 м

Канал RFQ-2 состоит из 160 периодов ускорения (80 периодов фокусировки) [4]. Графики изменения основных параметров на участках согласования, группировки и регулярного ускорения показаны на рис.2, где ϕ_s — фаза ВЧ-поля в тот момент, когда синхронная частица пролетает сечение с точной квадрупольной симметрией; R_0 — среднее расстояние от оси до поверхности электрода; K^2 — квадрат жесткости фокусировки; m — коэффициент синусоидальной модуляции электродов; T — фактор пролетного времени; γ_s — фактор дефокусировки; n — номер периода ускорения полупериода модуляции; z — продольная координата; W_s — энергия синхронной частицы.

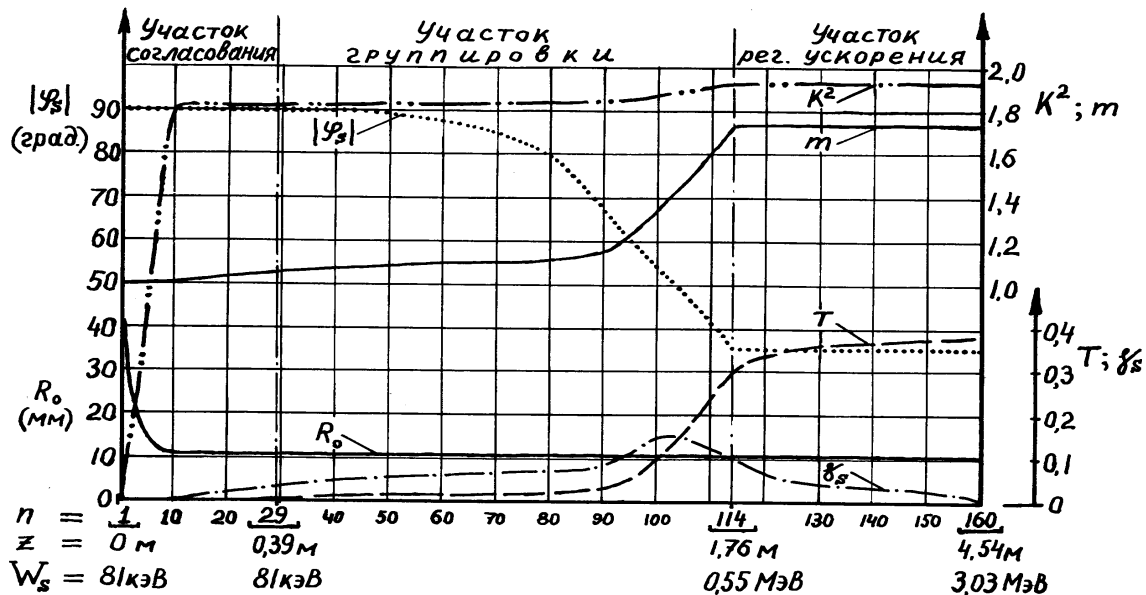


Рис. 2: Изменения основных параметров канала RFQ2.

В канале RFQ-2 улучшено поперечное согласование пучка во входном раструбе (11 полупериодов модуляции), где квадрат жесткости фокусировки K^2 изменяется по закону \sin^2 , а не линейному (как это было при первом включении RFQ-1) в функции от номера полупериода. Яснее, четче организовано продольное согласование, осуществляемое на 18 полупериодах, следующих сразу за входным раструбом. Поля и электроды RFQ-2 рассчитывались

по программе для реального полукруглого сечения электродов [5], а не идеального, как это было при расчетах канала RFQ-1. Приняты меры к устранению скачков в величинах параметров канала на стыках участков. Заканчивается канал динамическим согласователем [6], который, не изменяя энергию частиц, уменьшает зависимость эмиттанса пучка от фазы ВЧ-поля. Динамический согласователь предназначен для снижения роста эффективного эмиттанса выходного пучка.

Количество составляющих ускоритель RFQ-2 секций сокращено до шести. Длина каждой из них $\sim 0,8$ м. Триметаллический корпус (рис.1) включает в себя внутренний слой толщиной 3 мм, выполненный из бескислородной меди марки МОБ. Средний слой, обеспечивающий прочность конструкции, выполнен из стали-20, его толщина 15–20 мм. Материалом внешнего служит нержавеющая сталь (2 мм), что удобно для организации интенсивного теплоотвода. Электроды — медные с внутренними каналами водоохлаждения. Основания электродов соединяются с внутренней поверхностью корпуса медной фольгой толщиной 0,5 мм с помощью сварки. Оценки показывают, что конструктивное исполнение секций и заложенная схема охлаждающих каналов позволяют рассчитывать на получение среднего тока пучка до 5 мА.

Поверхность электродов, обращенная в апертурный канал, обрабатывалась на горизонтально-фрезерном станке с помощью радиально-вогнутых фрез. Отклонение точек рабочей поверхности электродов от их расчетного положения не превышало 100 мкм. После полировки качество рабочей поверхности соответствовало классу 8. Зазоры между торцами соседних в продольном направлении электродов составляли 0,5–1 мм. Точность продольной установки электродов равнялась 100 мкм, поперечной — 50 мкм, зазоры между смежными электродами в поперечном направлении (порядка 9 мм) выставлены с точностью 25 мкм [7].

При настройке полей использовался метод малых возмущений (вдоль квадрантов протаскивался диэлектрический шарик). Средняя неравномерность полей по квадрантам составляла $\pm 1\%$, вдоль квадрантов $\pm 2,5\%$, частота рабочей моды колебаний практически соответствовала расчетной, дипольные моды отстояли от нее на 3–4 МГц, добротность резонатора при ненагруженных петлях ввода ВЧ-мощности равнялась 9900. При одновременном перемещении 4 элементов подстройки, расположенных в средней части резонатора, в пределах ± 10 мм собственная частота резонатора изменялась в расчетных пределах ± 28 кГц, практически не изменяя распределение полей.

Общий вид ускорителя представлен на рис.3. Для получения промежуточного вакуума в резонаторе использовался турбомолекулярный насос ТМН-500, высокий вакуум — порядка $(7-10) \cdot 10^{-7}$ Торр — достигался с помощью 19 магниторазрядных насосов НМД-0,16-1.

Амплитудная разность потенциалов между смежными электродами в номинальном режиме выбрана равной 185 кВ. Максимальная напряженность поля на поверхности при этом 250 кВ/см, что составляет 1,85 от уровня, определяемого для частоты 148,5 МГц по зависимости Килпатрика. Ввод ВЧ-мощности проводился при давлении не выше $2 \cdot 10^{-6}$ Торр через 4 должным образом сфазированные петли, размещенные в вакууме по одной в каждой из 4 камер резонатора. Уровни, близкие к пороговому, были получены в течение первых часов тренировки. Дальнейшее увеличение ВЧ-мощности

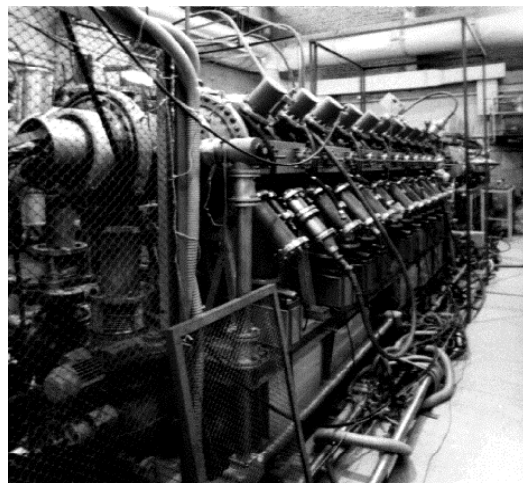


Рис. 3: Общий вид ускорителя RFQ2.

ограничивалось мультитактовыми разрядами в резонаторе. Рабочие уровни поля были получены через 80–100 часов тренировки при частоте повторения импульсов 3 Гц.

В качестве ионного источника использовался дуоплазматрон с холодным катодом и узлом импульсного прерывания потока газа на выходе источника. Для формирования пучка с требуемыми параметрами на входе в ускоритель (радиус пучка 10 мм, наклон огибающей 100 мрад) использовалась электростатическая трехэлектродная линза, расчетное напряжение которой составляло 65 кВ. Измерения на выходе инжектора показали, что параметры для 70–80% пучка можно привести в соответствие с входными условиями канала RFQ регулировкой режима работы источника и линзы. Измерительный канал на выходе ускорителя содержал магнитный анализатор [8], индукционные датчики тока, а также измеритель эмиттанса на базе перемещаемых щелей, люминофорного экрана, ПЗС-матрицы и цифрового осциллографа. Разрешающая способность тракта измерения эмиттанса составляла 0,01 см·мрад.

При номинальных значениях энергии инжекции и ВЧ-поля из 130 мА входного тока на выходе ускорителя было зафиксировано 60 мА. Распределение частиц по импульсам (рис. 4, слева) показывало, что в выходном пучке 92% частиц — протоны, имеющие импульс в пределах расчетного значения размаха сепаратрисы ($\pm 2,2\%$). Характер изменения спектров в зависимости от уровня ВЧ-поля (рис. 4, справа) свидетельствовал о достаточной электрической прочности канала и достижении расчетной равновесной фазы, на графике указа и действующий на частицы уровень ВЧ-поля в отвлеченных числах, но с учетом “подсадки”, которая достигала 2-2,5%. В спектрах помимо основного отмечались отдельные пики небольшой величины относящиеся к ионам Н, О и N различной зарядности, а также молекулам H_2O^+ .

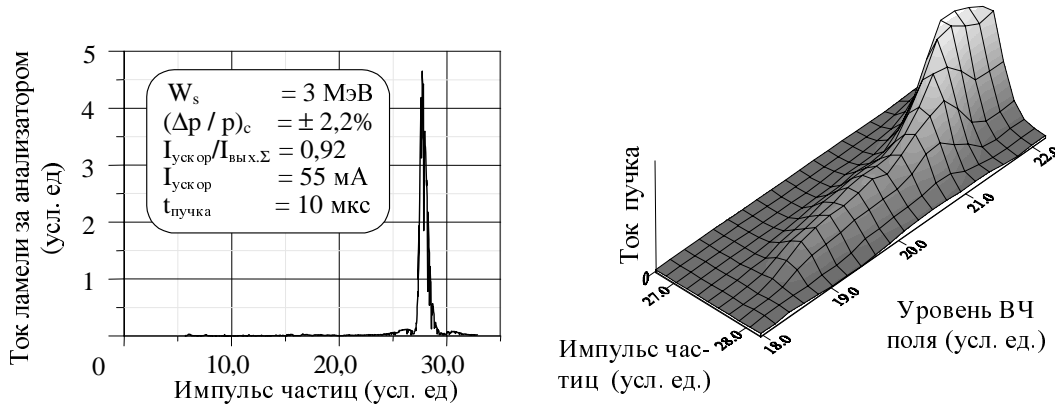


Рис. 4: Спектр выходного пучка (слева) и изменения распределения частиц по импульсам в зависимости от уровня ВЧ-поля (справа).

Маргинальный эмиттанс в горизонтальной плоскости и распределение относительных значений тока и его плотности по нормализованному эмиттансу при выходном импульсном токе 40 мА приведены на рис. 5 соответственно слева и справа. Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс в горизонтальной плоскости равнялся 0,8 см·мрад, в вертикальной — 1,06 см·мрад, что в 1,5–2 раза меньше пропускной способности канала, составляющей $V_n = 1,62 \text{ см·мрад}$.

Проведенный физический пуск ускорителя RFQ, предназначенного для работы с повышенным средним током, и предварительные измерения параметров его пучка показали работоспособность установки и близость параметров к расчетным. Изучение режимов работы и динамики пучка продолжается.

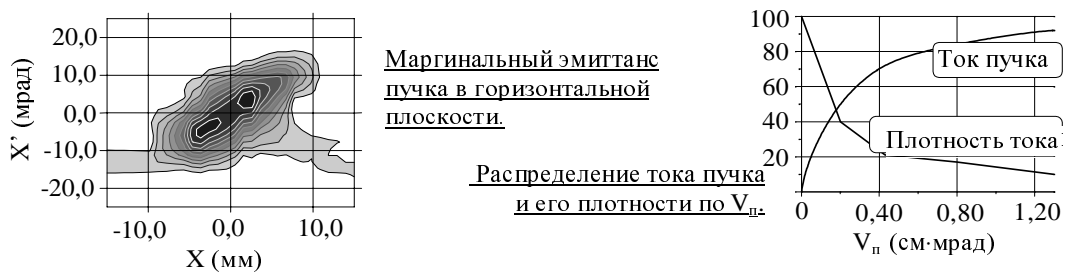


Рис. 5: Маргинальный эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости (слева) и распределение тока пучка и его плотности по V_p (справа).

Список литературы

1. Андреев В.А. и др. Тр. VIII Всесоюзн. совещ. по ускорит. заряд. частиц, т. II. Дубна, 1983, с.3.
 2. Балабин А.И. и др. Тр. X Всесоюзн. совещ. по ускорит. заряд. частиц, т. I. Дубна, 1987, с.403.
 3. Chuvilo I.V. et al. Proc. of the EPAC-96. Spain, Barcelona, 1996, v.3, p. 2674.
 4. Венгров Р.М. и др. Препринт ИТЭФ. – М., 1993, № 34-93.
 5. Балабин А.И. Препринт ИТЭФ. – М., 1981, № 107.
 6. Воробьев И.А., Коломиец А.А. АС. № 1265336 СССР, МПК H 05 h 9/04. Откр. Изобрет. 1991, № 34, с.247.
 7. Венгров Р.М. и др. XV Совещ. по ускорит. заряд. частиц. Сборн. докладов, Протвино. 1996, т.2, с.42.
- Лякин Д.А., Стасевич Ю.Б. Вопросы атомной науки и техники. Вып. 4,5, т.2, с.70. Харьков 1997.