

НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТЬ КОМПАКТНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. Парамонов^{а, 1}, А. Дуркин^а, А. Коломиец^{а, б}

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва

^б Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

Начальная часть (НЧ) компактного импульсного линейного ускорителя протонов с выходной энергией ≈ 230 МэВ предназначена для формирования и ускорения пучка с импульсным током до 250 мкА и до энергии ≥ 10 МэВ, позволяющей переход на ускоряющую структуру S -диапазона с высоким темпом ускорения. Важным условием является формирование сгустков с малым продольным и поперечным эмиттансом и предотвращение существенного роста эмиттанса при ускорении. Особое внимание уделено сбалансированности и надежности предлагаемых решений, доступности и мотивированной реализуемости элементов НЧ.

The initial part of a compact pulsed proton linac with an output energy of ≈ 230 MeV is intended for the formation and acceleration of a beam with a pulsed current of up to 250 μ A and up to an energy of ≥ 10 MeV, which allows the transition to accelerating structure of the S frequency range with a high acceleration rate. The essential condition is the formation of bunches with a small longitudinal and transverse emittance and preventing a significant emittance growth during acceleration. Special attention is paid to the balance and reliability of the proposed solutions, accessibility and motivated feasibility of elements.

PACS: 29.28.-a; 41.85.-pc; 07.78.+s

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для терапии онкологических заболеваний с использованием ускоренных до энергии ~ 230 МэВ протонов применяются циклические ускорители — изохронные циклотроны [1] и синхротроны [2]. Развитие технологии линейных ускорителей (ЛУ) позволяет создавать компактные установки, конкурирующие по параметрам с циклическими машинами. Низкий уровень потерь частиц при ускорении пучка в ЛУ снижает требования к радиационной защите. Высокая, не менее 50 Гц, частота повторения импульсов позволяет реализовать более быструю модуляцию интенсивности и энергии пучка. В ЛУ может быть сформирован и ускорен «карандашный» пучок частиц, обеспечивающий возможность быстрого трехмерного

¹E-mail: paramono@inr.ru

сканирования. Наиболее проработанным специализированным ЛУ терапевтического назначения является реализуемый в настоящее время ЛУ проекта LIGHT [3].

Для реализации заявляемых параметров ЛУ LIGHT в целом предполагаются амбициозно высокие значения электрического поля на поверхности ускоряющей структуры, приемлемость которых при долговременной эксплуатации прикладной машины в настоящее время не подтверждена и в ЛУ для проведения исследований.

Общей задачей является разработка физического обоснования ускорителя ионов H^+ со сравнимыми с ЛУ LIGHT характеристиками, но достигаемыми при умеренных, апробированных в эксплуатации величинах электрического поля на поверхности.

Формирование пучка осуществляется в НЧ ускорителя, и ожидаемые параметры сгустков на выходе НЧ во многом определяют параметры ЛУ в целом. Задача НЧ — формирование сгустков с малыми продольным и поперечным эмиттансами и ускорение их до энергии, достаточной для передачи в основную часть (ОЧ) ЛУ.

1. ВЫБОР РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ, ИНЖЕКЦИЯ И ГРУППИРОВАНИЕ ПУЧКА

Основной набор энергии ионов H^+ предполагается в ОЧ ЛУ с ускоряющей структурой на бегущей волне в S -частотном диапазоне [4]. Электродинамические характеристики (ЭДХ) этой структуры позволяют ускорять протоны начиная с энергии > 10 МэВ. Импульсный режим работы ОЧ, а также ЛУ в целом, и длительность импульса тока 3–5 мкс определяются характеристиками выпускаемых промышленностью клистронов S -диапазона с достаточной величиной импульсной ВЧ-мощности. Наибольшее распространение имеют СВЧ-элементы и приборы на частоте $f_0 = 2856$ МГц, которая и выбрана в качестве рабочей для ОЧ ЛУ.

Начальная часть ЛУ должна работать на субгармонике этой частоты $f_1 = f_0/n$, $n = 2, 3, \dots$. Сравнение ЭДХ ускоряющих структур для применения в НЧ на различных частотах f_1 проведено в работе [5]. Принимались во внимание требования динамики частиц, ВЧ-эффективность и габариты структур, время переходного процесса, реализуемость источников ВЧ-питания. Выбрана структура с трубками дрейфа на рабочем колебании H -типа и π -видом распределения ускоряющего поля — ИН DTL на частоте $f_1 = 476$ МГц — общей для всех резонаторов НЧ. При малых поперечных размерах и достаточно низкой добротности в диапазоне относительных скоростей частиц $0,04 \leq \beta \leq 0,2$ структура ИН DTL имеет наибольшую величину эффективного шунтового сопротивления.

Формирование пучка начинается с источника протонов. Предполагаемый пучок ионов H^+ с энергией 60 кэВ, импульсным током 500–600 мкА и поперечным эмиттансом $\epsilon_{\perp} \approx 0,1\pi$ мм·мрад формируется коллимацией из более интенсивного пучка. Начальное ускорение пучка осуществляется в резонаторе с ВЧ квадрупольной фокусировкой — RFQ. Основными особенностями данного резонатора RFQ являются формирование сгустков с малым продольным эмиттансом и на относительно малой длине ускорение их до приемлемой энергии 1,56 МэВ. За счет частичного захвата частиц в режим ускорения на выходе RFQ формируются сгустки достаточной интенсивности с протяженностью по фазе $\approx 15^\circ$ и разбросом частиц по энергии ± 5 кэВ.

Таблица 1. Проектные параметры резонатора RFQ

Параметр	Значение
Средний радиус апертуры, мм	2,7
Разность потенциалов электродов, кВ	75
Коэффициент модуляции электродов, макс.	1,8
Синхронная фаза, °	-90 ÷ -10
Выходная энергия протонов, МэВ	1,56
$E_{s \max}$ в единицах E_k	1,57
Длина электродов, в длине волны	1,48 λ
Расчетная добротность	9720
Импульсная ВЧ-мощность, кВт (расчет)	91
Разделение с дипольными модами, МГц	8

Расчетные характеристики резонатора, приведенные в табл. 1, являются достаточно умеренными и апробированы в практике действующих.

Линия МЭВТ общей протяженностью ≈ 610 мм предназначена для согласования выходящего из RFQ пучка с последующим ускоряюще-фокусирующим каналом (УФК) резонаторов DTL. Линия содержит четыре квадрупольные линзы длиной 50 мм с величинами фокусирующих градиентов G от 20 до 45 Тл/м. Для поглощения как периферийных частиц, так и частиц с низкой энергией, порядка энергии инжекции, на выходе RFQ предусмотрен коллиматор. Для предотвращения расплывания сгустков при дрейфе в МЭВТ предусмотрен двухззорный группирователь с эффективным ВЧ-напряжением 55 кВ. На линии есть место для размещения компактных элементов диагностики пучка, например датчика гармоник тока. Фазовые портреты пучка на выходе МЭВТ показаны на рис. 1.

При малом диаметре апертуры фокусирующих элементов, 8–10 мм, и относительно низкой энергии протонов в МЭВТ возможно применение электромагнитных, электростатических и ВЧ квадрупольных линз. Заманчиво применение компактных линз с постоянными магнитами — РМҚ. Однако участок согласования существенно влияет на движение частиц в последующем УФК DTL, что требует возможности управления элементами.

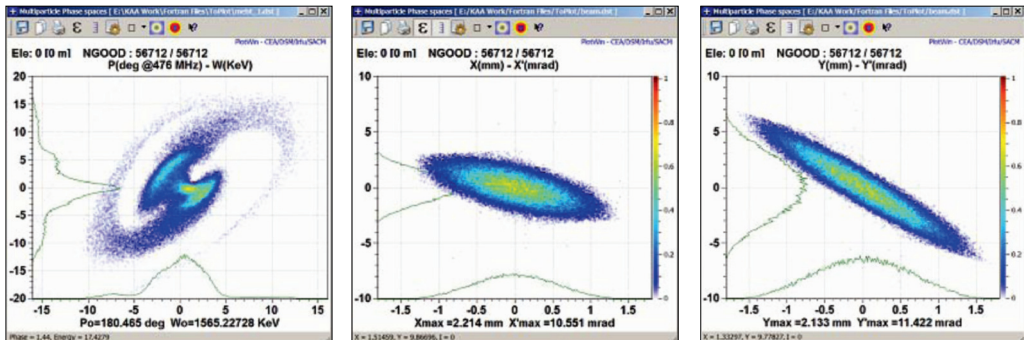


Рис. 1. Фазовые портреты пучка на выходе МЭВТ

2. СТРУКТУРА, СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УФК DTL

УФК DTL является квазипериодической системой, содержащей 11 резонаторов ИД DTL и 10 расположенных между ними фокусирующих элементов. После исследования множества сочетаний различных схем фокусировки, параметров элементов, длин ускоряющих резонаторов и величин ускоряющего градиента в них как компромиссный вариант выбраны резонаторы ИД DTL с 8 трубками дрейфа в каждом. Для устранения скольжения ускоряемых протонов по фазе длины периодов увеличиваются с ростом энергии частиц, и распределение E_z на оси сформировано из условия $E_0 T = 4,0 \text{ МВ/м} = \text{const}$ по периодам резонатора, где E_0 — средняя по периоду DTL величина E_z и T — коэффициент пролетного времени. Малая протяженность входного пучка по фазе позволяет выбрать величину синхронной фазы $\phi_s = -15^\circ$, ослабив дефокусирующее действие ускоряющего поля и поддержав высокий темп ускорения. Эскиз первого резонатора DTL 1 и расчетное распределение E_z по оси показаны на рис. 2.

Фокусирующий элемент состоит из двух квадрупольных линз РМQ длиной 35 мм, разнесенных на некоторое расстояние для уменьшения взаимного компенсирующего влияния.

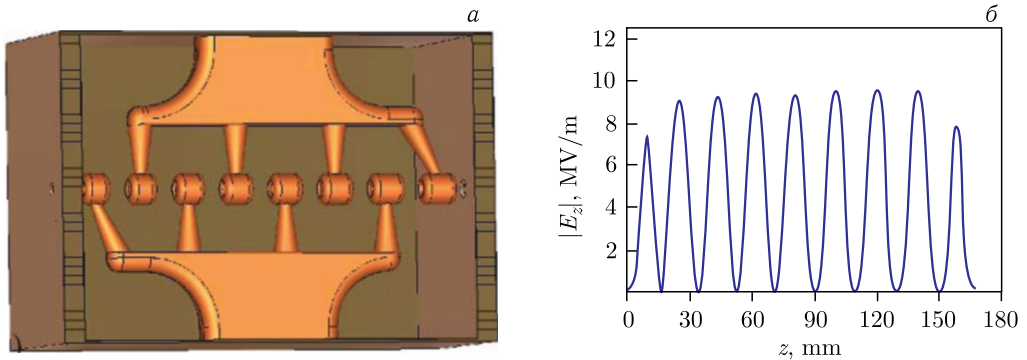


Рис. 2. Эскиз резонатора (а) и распределение E_z на оси для DTL 1 (б)

Таблица 2. Параметры элементов УФК DTL

Номер DTL	W_{out} , МэВ	L , мм	$E_{s \text{ max}}/E_k$	P_{imp} , кВт	G , Тл/м
1	2,17	155	0,96	15,0	76
2	2,88	181	0,96	17,4	90
3	3,69	207	1,05	21,2	90
4	4,60	233	1,09	24,5	90
5	5,61	258	1,14	32,6	92
6	6,72	284	1,19	34,2	105
7	7,93	309	1,25	37,8	110
8	9,24	335	1,30	42,9	110
9	10,64	360	1,34	48,1	110
10	12,14	385	1,40	54,9	110
11	13,83	410	1,50	62,0	120

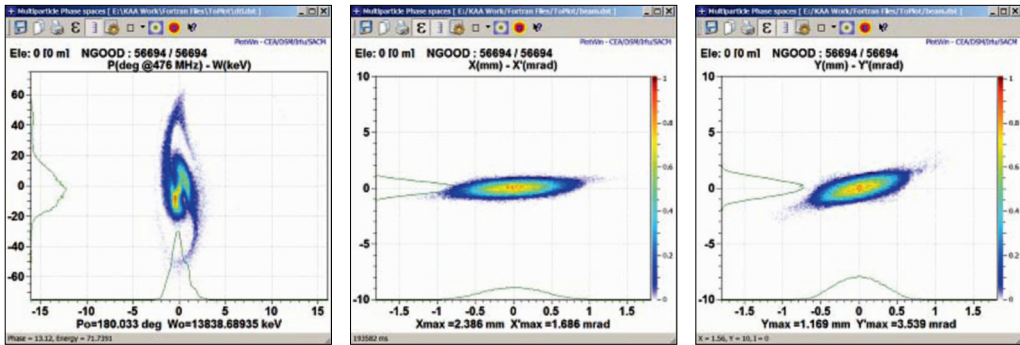


Рис. 3. Фазовые портреты пучка на выходе НЧ

Такой УФК имеет не самую низкую чувствительность к погрешностям параметров линз, однако рабочая точка достаточно удалена от границ области устойчивости. Если принять во внимание небольшое число периодов, величины огибающей пучка, необходимые градиенты в линзах, а также общую длину, такой вариант УФК будет оптимальным компромиссом. Общие характеристики элементов УФК приведены в табл. 2, где W_{out} — энергия частиц на выходе резонатора, L — длина резонатора, $E_{s \text{ max}}/E_k$ — отношение максимальной напряженности электрического поля на поверхности структуры $E_{s \text{ max}}$ к величине порога Килпатрика $E_k = 20,88$ МВ/м при $f_1 = 476$ МГц, P_{imp} — необходимая величина импульсной ВЧ-мощности, на 40% превышающая расчетную величину. Фазовые портреты пучка на выходе УФК показаны на рис. 3. Следует отметить малую протяженность пучка протонов по фазе при относительно низкой для ЛУ протонов энергии 13,83 МэВ.

3. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЧ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поперечные огибающие пучка на участке МЕВТ–DTL показаны на рис. 4 для 90% частиц. Коэффициент прохождения частиц в сформированных сгустках от входа в МЕВТ до выхода из DTL 11 составляет 99,1%. Для 95% частиц рост продольного эмиттанта на этом участке — 20%, а рост поперечного эмиттанта не превышает единиц процентов. Малые амплитуды поперечных огибающих (см. рис. 4) позволяют считать сформированный выходной пучок «карандашным».

Длина НЧ от входа в RFQ до выхода DTL 11 равна $\approx 5,7$ м. Выходная энергия протонов 13,83 МэВ и не превышающая 5° по фазе полная ширина пучка с запасом обеспечивают переход в область устойчивости ОЧ ЛУ на частоте 2856 и позволяют поднять темп ускорения в ОЧ за счет малой абсолютной величины $\phi_s \approx -15^\circ$. Приводимые расчетные параметры пучка являются следствием стратегии изначального формирования в RFQ пучка с малым продольным эмиттансом.

Оцененная с запасом в 40% общая величина импульсной ВЧ-мощности составляет ≈ 520 кВт на 13 каналов ВЧ-усиления. Величина средней рассеиваемой мощности не превышает единиц кВт. Сочетание умеренно высокой частоты 476 МГц, умеренной величины импульсной мощности и низкой средней позволяют [6] применить в системе ВЧ-питания в НЧ твердотельные ВЧ-усилители.

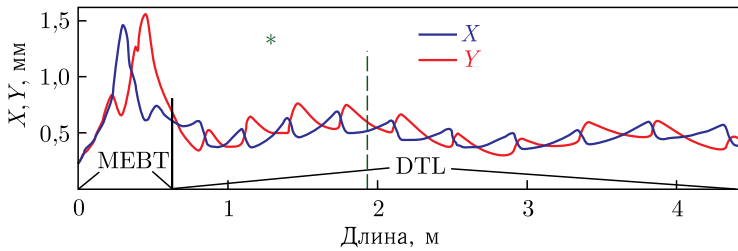


Рис. 4. Поперечные огибающие пучка на участках МЭВТ и УФК DTL для 90% частиц. Звездочка — возможна коллимация пучка

Малая апертура в фокусирующих элементах позволяет обеспечить условия фокусировки в УФК DTL применением компактных квадрупольей PMQ на основе сплава SmCo_5 с высокой радиационной стойкостью и температурной стабильностью. Необходимые величины градиента G имеют резерв по сравнению с достигнутыми на практике передовыми результатами [7].

Предлагаемая схема и параметры элементов НЧ полностью удовлетворяют поставленной задаче — формированию качественного пучка ионов H^+ для последующего ускорения в основной части и реализации НЧ с надежными, апробированными в практике эксплуатационными параметрами.

Авторы признательны коллегам из ИЯИ РАН за полезные замечания, а также лаборатории DEZY, в рамках сотрудничества предоставившей возможность провести иллюстрирующие расчеты с использованием пакета CST.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syresin E. Centers of Hadron Therapy on the Basis of Cyclotrons // Proc. of RuPAC 2008. 2008. P. 316–320; accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r08.
2. Balakin V. et al. Status of the Proton Therapy Complex Prometheus // Proc. of RuPAC 2018. 2018. P. 135–138; accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018.
3. Degiovanni A. et al. LIGHT: A Linear Accelerator for Proton Therapy // Proc. of NaPAC 2016. 2016. P. 1282–1286; accelconf.web.cern.ch/AccelConf/napac2016.
4. Парамонов В. Возможные параметры ускорения протонов на обратной гармонике бегущей волны // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1404–1411.
5. Парамонов В., Дуркин А. Сравнение ускоряющих структур для протонов низкой энергии // Тр. конф. «ЛАПЛАЗ-2019». 2019. С. 122–123; conf.laplas/mephi.ru.
6. Sharkov G. et al. Next Generation High Power Solid-State RF Sources // Proc. of RuPAC 2016. 2016; accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016.
7. Ghaith A. et al. Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources // Instruments. 2019. V. 3, No. 27.