

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

*В. В. Парамонов^{а,1}, А. П. Дуркин^а, А. А. Коломиец^а,
А. С. Курилик^а, Л. Ю. Овчинникова^{а,б}*

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва

^б АО НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, Россия

Основная часть (ОЧ) компактного импульсного линейного ускорителя протонов предназначена для ускорения пучка с импульсным током до 2,5 мА до выходной энергии, регулируемой в диапазоне от 60 до 230 МэВ, с сохранением малых поперечных размеров пучка. Применена ускоряющая структура *S*-диапазона на бегущей волне, обеспечивающая высокий темп ускорения и позволяющая регулировать выходную энергию сгустков в пределах ВЧ-импульса. Особое внимание уделено сбалансированности и надежности предлагаемых решений, доступности и мотивированной реализуемости элементов ОЧ.

The main part of a compact pulsed proton linac is intended for acceleration of the beam with pulse current up to 2.5 mA for output energy, which can be controlled in the range from 60 to 230 MeV, conserving small transverse bunch dimensions. Traveling wave accelerating structure in *S*-band frequency range allows both high accelerating rate and energy regulations within RF pulse. Special attention is paid to the balance and reliability of the proposed solutions, accessibility and motivated feasibility of elements of the main part.

PACS: 87.53.-j

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии линейных ускорителей (ЛУ) позволяет создавать компактные установки для применения в протонной терапии, 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 3D-сканирования пучком.

Схема разрабатываемого ЛУ показана на рис.1. Начальная часть ускорителя (НЧУ), состав и параметры элементов, характеристики пучка рассмотрены в работе [1]. Дальнейшие исследования показали возможность ускорения в НЧУ импульсного тока до 2,5 мА без заметной потери качества пучка. На выходе НЧУ, работающей на частоте 476 МГц, пучок имеет энергию 13,8 МэВ при фазовой протяженности сгустков в 4°. Это позволяет производить дальнейшее ускорение в ОЧ компактными ускоряющими структурами *S*-диапазона на частоте 2856 МГц.

¹E-mail: paramono@inr.ru

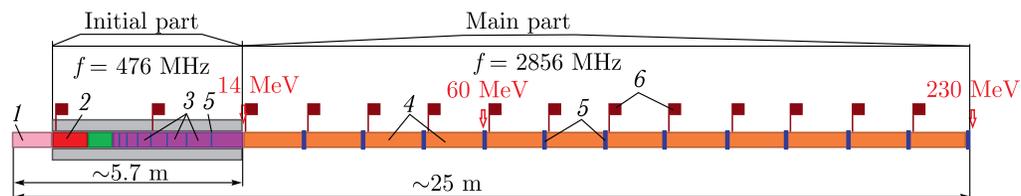


Рис. 1. Схема ускорителя: 1 — источник протонов; 2 — предускоритель RFQ; 3 — ускоряющие резонаторы начальной части; 4 — ускоряющие секции ОЧ; 5 — фокусирующие элементы

УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩИЙ КАНАЛ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ

Как показано в работе [2], в структуре на бегущей волне при использовании обратной гармонике $n = -1$ ускорение протонов возможно с ≈ 9 МэВ, $\beta > 0,14$. В ОЧ разрабатываемого ЛУ применена ускоряющая структура на основе круглого диафрагмированного волновода. Реализована магнитная связь между ячейками, что позволяет более гибко выбирать параметры ускоряющих секций. Ячейка ускоряющей структуры показана на рис. 2, а.

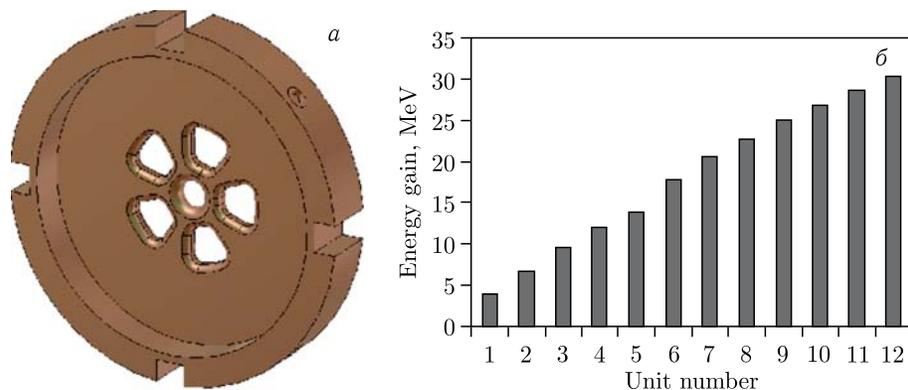


Рис. 2. Ячейка ускоряющей структуры (а) и диаграмма прироста энергии протонов на модулях ОЧ (б)

ОЧ ускорителя состоит из 12 модулей. Каждый модуль содержит секцию ускоряющей структуры с постоянным градиентом, источник ВЧ-питания и фокусирующие элементы. В первых пяти модулях, ускоряющих протоны до энергии ≈ 60 МэВ, секции реализованы на обратной, $n = -1$, гармонике ускоряющего поля. В последующих модулях ускоряющие секции используют основную гармонику $n = 0$. В каждой ускоряющей секции число ячеек и их параметры оптимизированы для получения максимального прироста энергии протонов (рис. 2, б). При этом реализуется высокий, близкий к максимальному для каждой секции при заданной мощности ВЧ-источника, темп ускорения. Диаграмма напряженности ускоряющего поля для модулей ОЧ показана на рис. 3, а, и средняя величина по секциям $E_0 T = 13,2$ МВ/м. Для обеспечения надежной работы ОЧ в установке прикладного назначения и уменьшения вероятно-

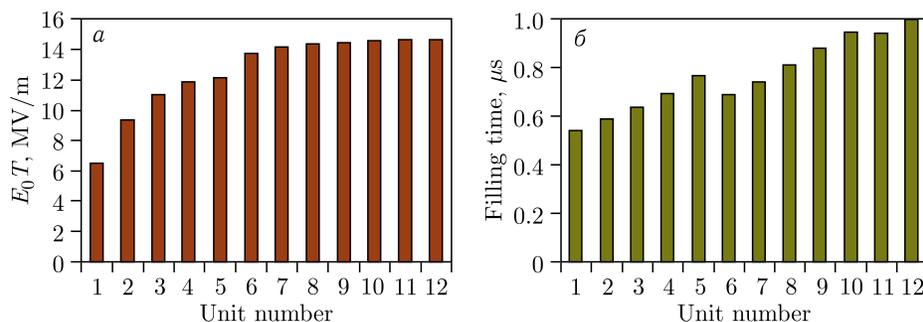


Рис. 3. Диаграммы величины ускоряющего поля E_0T (а) и времени заполнения τ_{fill} (б) секций ОЧ

сти ВЧ-пробоев максимальная напряженность электрического поля на внутренней поверхности ячеек не превышает $E_{s \text{ max}} < 0,95E_k$, где $E_k = 45,75$ МВ/м — величина критерия Килпатрика на частоте 2856 МГц.

Анализ схем фокусировки в ОЧ показал преимущество структуры ФДО, позволяющей как обеспечить «карандашный» пучок с радиусом огибающей < 1 мм при ускорении до максимальной энергии 230 МэВ, так и при регулировке выходной энергии ЛУ провести пучок с энергией от 60 МэВ до выхода ЛУ с сохранением поперечных размеров [3]. Предполагается использование дублетов квадрупольных линз с постоянными магнитами на основе Sm_2Co_5 и фокусирующим градиентом $G < 215$ Тл/м. Расчеты показывают, что благодаря малой величине радиуса апертуры линз требуемая величина G обеспечивается с достаточным запасом. Общая длина ОЧ по оси пучка составляет ≈ 20 м.

В качестве источников ВЧ-питания рассматриваются многолучевые усилительные клистроны S -диапазона с фокусировкой постоянными магнитами, выпускаемые АО НПП «Торий» [4]. Отсутствие электромагнитной системы фокусировки, высокий к. п. д. и относительно низкая величина напряжения на катоде делают такие приборы привлекательными для эксплуатации в прикладной установке. А возможность обеспечения относительно большой длительности ВЧ-импульса до 16 мкс открывает весьма привлекательную возможность регулировки выходной энергии пучка.

РЕГУЛИРОВКА ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ ПУЧКА ДЛЯ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

В поперечных направлениях x, y отклонение пучка предполагается с помощью относительно медленной, работающей с частотой следования ВЧ-импульсов, магнитной системой. Для сканирования по глубине проникновения требуется изменение выходной энергии пучка. Простейшим способом является установка выходной энергии в диапазоне от 60 до 230 МэВ, отключение нужного количества выходных резонаторов и изменение фазы поля всего ВЧ-импульса в последнем действующем. В таком случае скорость перестройки определяется частотой повторения ВЧ-импульсов. С целью повышения скорости перестройки в проектах ЛУ аналогичного назначения, но с ускоряющей структурой на стоячей волне, например [5], заложена частота повторе-

ния 200 Гц при коротком, ≈ 3 мкс ВЧ-импульсе и рассматриваются возможности ее повышения до 1000 Гц.

Для предлагаемого ЛУ разрабатывается другой способ, позволяющий на порядки повысить скорость перестройки энергии выходного пучка и использующий преимущества длинного ВЧ-импульса.

В отличие от резонаторов на стоячей волне, структура на бегущей волне является безынерционным элементом. Фаза поля волны, распространяющейся по структуре, полностью определяется фазой ВЧ-поля на входе в структуру, т. е. фазой ВЧ-поля из ВЧ-источника. Исследуемый процесс регулировки схематически пояснен на рис. 4 на примере последнего модуля ОЧ. На рис. 4, *а* показана зависимость выходной энергии пучка от фазы ВЧ-поля при расчетной фазе синхронной частицы $\varphi = -10^\circ$. Пусть фазам φ_1 и φ_2 соответствуют выходные энергии W_1 и W_2 . На рис. 4, *б* схематично показаны различные моменты распространения фронта волны по структуре в моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$. Отметим, что дисперсия структуры с магнитной связью, а следовательно, и групповая скорость бегущей волны отрицательные. Пусть к моменту $t_1 = 0$ структура полностью заполнена полем с фазой φ_1 , показанной на рис. 4, *б* зеленым цветом, и при $t_1 = 0$ на ВЧ-вход структуры, расположенный в конце структуры, подается ВЧ-сигнал с фазой поля φ_2 . Фронт волны с фазой φ_2 , показанной серым цветом, начинает распространяться справа налево, и к моментам t_2 и t_3 волна с фазой φ_2 занимает все большие части структуры. Как видно из диаграммы на рис. 3, *б*, время заполнения секции $\tau_{\text{fill}} \approx 1 \cdot 10^{-6}$ с. А время пролета сгустка через структуру $\tau_b \approx 7 \cdot 10^{-9}$ с на несколько порядков меньше. За время $t = t_4 \approx \tau_{\text{fill}} \approx 1 \cdot 10^{-6}$ с через структуру пролетит ≈ 476 сгустков, каждый из которых видит поля с фазами φ_1 и φ_2 в разной пропорции и будет иметь выходную энергию, равномерно меняющуюся в диапазоне от W_1 до W_2 .

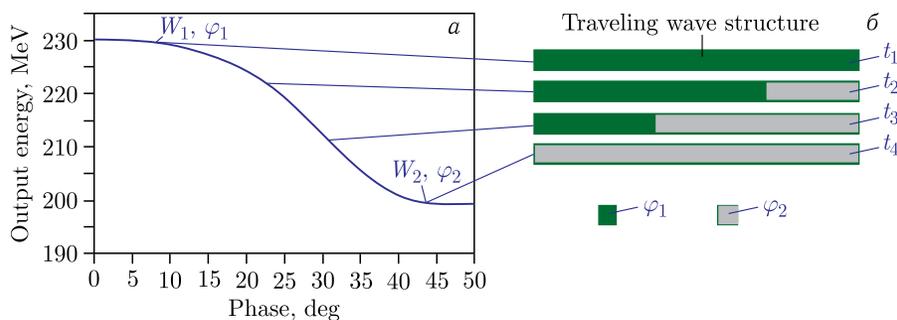


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Диаграммы величины ускоряющего поля E_0T (а) и времени заполнения τ_{fill} (б) секций ОЧ

Изменение фазы поля проводится на низком уровне ВЧ-мощности, перед входом сигнала в мощный ВЧ-усилитель. Изменению фазы на $3,0^\circ$ за время $\approx 1 \cdot 10^{-6}$ с соответствует эквивалентная ширина полосы ≈ 10 кГц, что много меньше ширины полосы пропускания элементов ВЧ-тракта. Перекрывая таким образом шагами диапазон изменения фазы в $45,0^\circ$ за $\approx 15 \cdot 10^{-6}$ с, как видно из рис. 4, *а*, можно обеспечить скорость регулировки выходной энергии до 30 МэВ за время $\approx 15,0$ мкс. Как показывают результаты моделирования распределения дозы [6], такое быстрое управление

выходной энергией пучка позволяет оперативно обеспечить как равномерное, так и неоднородное распределение дозы по продольной координате.

В настоящее время ведется детальное исследование нестационарных процессов распространения волны в ускоряющей структуре, взаимодействия сгустков протонов с составной волной и прохождения ВЧ-сигнала через элементы ВЧ-тракта.

При импульсном токе пучка до 2,5 мА в каждом сгустке содержится до $\sim 3 \cdot 10^7$ частиц и за время $\approx 15 \cdot 10^{-6}$ с одного ВЧ-импульса поставляется до $\sim 2 \cdot 10^{11}$ частиц. Такая производительность ЛУ перекрывает потребности практической медицины, позволяет уверенно реализовывать режимы FLASH-терапии и открывает возможность исследований в области Ultra FLASH — более высоких доз за короткое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Парамонов В., Дуркин А., Коломиец А.* Начальная часть компактного линейного ускорителя прикладного назначения // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 701–706.
2. *Парамонов В.* Возможные параметры ускорения протонов на обратной гармонике бегущей волны // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1404–1411.
3. *Дуркин А. П., Коломиец А. А., Парамонов В. В.* Анализ схем фокусировки в основной части линейного ускорителя протонов для медицины // Тр. VII Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исслед. и технологии (ЛАПЛАЗ-2021)», онлайн, 22–25 марта 2021 г. С. 311–312; conf.laplas/mephi.ru.
4. *Комаров Д. А. и др.* Разработка мощного усилительного клистрона S-диапазона КИУ 278 // Тр. VII Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исслед. и технологии (ЛАПЛАЗ-2022)», НИЯУ МИФИ, Москва, 22–25 марта 2022 г.; conf.laplas/mephi.ru.
5. *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.
6. *Овчинникова Л. Ю., Курилик А. С.* Машинное обучение для формирования распределения дозы по глубине в протонной терапии // Тр. VII Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исслед. и технологии (ЛАПЛАЗ-2022)», НИЯУ МИФИ, Москва, 22–25 марта 2022 г.; conf.laplas/mephi.ru.

Получено 18 ноября 2022 г.