

ОСОБЕННОСТИ БЫСТРОЙ РЕГУЛИРОВКИ ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

© 2025 г. Л. Ю. Овчинникова^а, *, А. П. Дуркин^а, В. В. Парамонов^а

^аИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: lubovch@inr.ru

Поступила в редакцию 10.05.2024 г.

После доработки 10.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Суммируются результаты исследований процессов при быстрой регулировке выходной энергии линейного ускорителя для протонно-лучевой терапии за время одного ВЧ импульса. Рассматриваются как особенности формирования необходимого импульса ВЧ питания, так и распространения ВЧ импульса в безынерционной дисперсной структуре на бегущей волне. Особое внимание уделено динамике частиц в нестационарном электромагнитном ВЧ поле. Применение рассматриваемого метода регулировки позволит многократно повысить скорость сканирования по глубине объекта облучения.

Ключевые слова: протонная терапия, TW структура, линейный ускоритель, моделирование динамики пучка

DOI: 10.56304/S2079562924060253

1. ВВЕДЕНИЕ

Регулировка выходной энергии (ВЭ) линейного ускорителя (ЛУ) для протонной терапии (ПТ) в диапазоне от ~70 до ~230 МэВ необходима для сканирования по глубине объекта облучения. В реализуемых ЛУ – LIGHT [1] и TOP-IMPLART [2], в том числе и для энергии протонов свыше 70 МэВ, применены ускоряющие структуры (УС) на стоячей волне (СВ). Регулировка ВЭ осуществляется отключением некоторых выходных резонаторов и изменением фазы и амплитуды ускоряющего поля в регулирующем резонаторе от одного ВЧ импульса к другому. Поэтому для повышения скорости регулировки ВЭ повышается частота повторения, >200 Гц, коротких, 3–5 мкс, мощных ВЧ импульсов, большая часть длительности которых тратится на переходный процесс в высоко добротных УС.

В разрабатываемом в ИЯИ РАН ЛУ для ПТ [3], схема которого показана на рис. 1, применены УС на Бегущей Волне (БВ) с постоянным градиентом и магнитной связью ячеек. Участок энергий от 60 до 230 МэВ содержит 8 УС БВ с темпом ускорения до 14.5 МэВ/м при проектном значении синхронной фазы ϕ_s равном -10° . Выбор УС БВ позволяет осуществить регулировку ВЭ за время одного мощного ВЧ импульса длительностью до 16 мкс, многократно повысив скорость перестройки ВЭ без повышения частоты следования ВЧ импульсов.

2. ПРИНЦИП РЕГУЛИРОВКИ ВЭ ЛУ В ТЕЧЕНИЕ ВЧ ИМПУЛЬСА

УС БВ является безынерционным элементом, в котором распределение амплитуды и фазы ускоряющего поля полностью определяется амплитудой и фазой входного ВЧ сигнала. Время заполнения

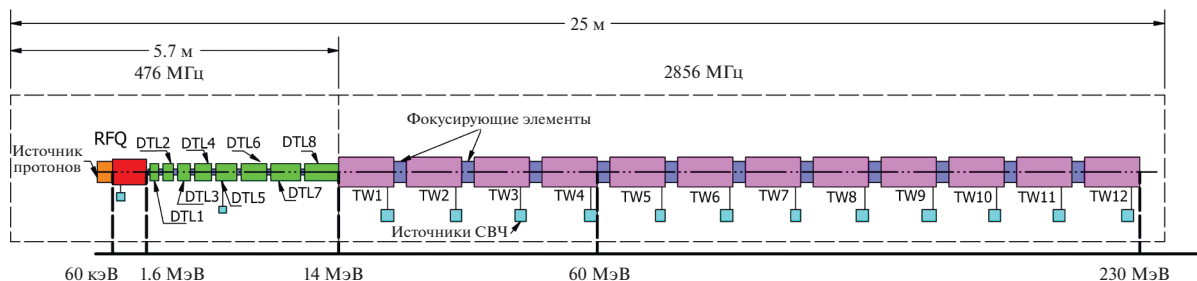


Рис. 1. Схема разрабатываемого в ИЯИ РАН ЛУ для ПТ [3].

УС БВ, т.е. время распространения волны по УС, составляет ~ 1 мкс [4] и на два порядка превышает время пролета сгустка.

На низком уровне ВЧ мощности, фазе регулирующего ВЧ каскада ϕ интервалами ~ 1 мкс дается приращение $\Delta\phi$ порядка единиц градусов. Техническая реализация изменений фазы за времена 0.1–1 мкс показана в работе [5]. При малых приращениях $\Delta\phi$ спектр фазо-модулированного сигнала более чем на порядок уже полосы пропускания мощного усилительного клистрона, например [6]. ВЧ сигнал с измененной фазой практически без искажений усиливается, поступает на вход УС и начинает распространяться вдоль структуры. Режим работы мощных элементов ВЧ системы не меняется, что повышает стабильность работы этой ВЧ системы.

За время ~ 1 мкс через УС пролетает 476 сгустков. Каждый последующий сгусток, по сравнению с предыдущим, испытывает действие существующего (предыдущего) поля с фазой ϕ и распространяющегося поля с фазой $\phi + \Delta\phi$ в разных пропорциях и, соответственно, имеет на выходе УС отличающуюся энергию.

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование распространения электромагнитной волны в дисперсной УС с переменной групповой скоростью методом эквивалентных схем детально рассмотрено в [7] на примере самой длинной УС ЛУ – TW12, содержащей 102 ячейки, структуры. Параметры эквивалентных схем ячеек определены из проектных электродинамических параметров ячеек TW12. Малая величина импульсного тока пучка [4] позволяет не учитывать при моделировании эффекты нагрузки током. Результаты моделирования совпадают с физическими представлениями и наглядно иллюстрируют процесс распространения фронта изменения фазы поля, с соответственным дисперсной структуре расплыванием фронта, при постоянстве амплитуды волны.

Изменение фазы поля, зависящее от текущего момента времени t и номера ячейки m учитывается при моделировании динамики частиц. Также учитываются высшие пространственные гармоники в распределении ускоряющего поля. Кроме того, однозначная связь компонент поля для волны типа TM01 позволяет определить и учесть высшие пространственные гармоники в поперечных составляющих электрического E и магнитного B полей.

$$\begin{aligned} \frac{d\beta_x}{dz} &= \frac{e}{W_0\beta\gamma} E_x - \frac{e\mathbf{c}}{W_0\gamma} B_y, \quad \frac{d\beta_y}{dz} = \frac{e}{W_0\beta\gamma} E_y - \frac{e\mathbf{c}}{W_0\gamma} B_x, \\ \frac{d\beta}{dz} &= \frac{e}{W_0\beta\gamma^3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[E_{zn}(x, y, m, t) \cos \times \right. \\ &\quad \times \left(\phi - \frac{4\pi^2 n}{\lambda\beta_{\text{cell}}\theta} z + \phi_s + \phi_{RF}(m, t) \right) \Bigg], \\ \frac{d\phi}{dz} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{d\tau}{dz} - \frac{1}{\beta_{\text{cell}}} \right], \end{aligned}$$

где λ и β_{cell} – длина и относительная фазовая скорость волны в ячейке, W_0 – энергия покоя протона, β и γ – относительная скорость и Лоренц-фактор частицы, ϕ_s – расчетное значение синхронной фазы, $\tau = ct$ и $\phi = \omega\tau/c - 2\pi z/\lambda\beta_c$ – нормированное время и фаза частицы.

Пример регулировки ВЭ в структуре TW12, номинально ускоряющей протоны от 200 до 230 МэВ, в течение одного ВЧ импульса показан на примере импульса длительностью 7 мкс. Фаза ϕ меняется скачкообразно через 1 мкс от 0° до 48° с шагом 8° . Пучок инжектируется в TW12 начиная с момента времени 1 мкс, когда вся структура уже заполнена СВЧ полем для номинального ускорения, но изменение фазы ϕ входного ВЧ сигнала еще не началось.

На рис. 2 приведены графики зависимостей от времени средней энергии сгустка и среднеквадратичного отклонения энергии частиц на выходе TW12. Пунктирные линии показывают соответствующие характеристики пучка на входе.

Объединяющая гистограмма изменения энергии частиц на выходе TW12 во время всего процесса показана на рис. 3.

Существенная, на десятки МэВ, регулировка ВЭ возможна только при нарушении условия автофазировки движущегося в УС сгустка, когда сгусток частью или полностью движется вне сепаратрисы. Движение вне сепаратрисы сопровождается наиболее быстрым изменением ВЭ с изменением фазы ВЧ поля.

В режиме номинального ускорения, на плоскости разностей фаз и энергий ($\phi - \phi_s$, $W - W_s$) координаты центра сгустка совпадают с центром области устойчивых продольных колебаний. Изменение начального значения фазы ϕ сдвигает положение центра сгустка относительно центра устойчивых колебаний. Пока координаты частиц на входе в УС остаются в зоне устойчивости, существенного изменения ВЭ быть не может. Изменение ВЭ происходит если координаты частиц при изменении ϕ выходят из области устойчивости. При дальнейшем изменении ϕ появляется интервал ϕ , в пределах которого ВЭ в зависимости от начальной ϕ уменьшается от номинального выходного значения УС до начальной входной энергии.

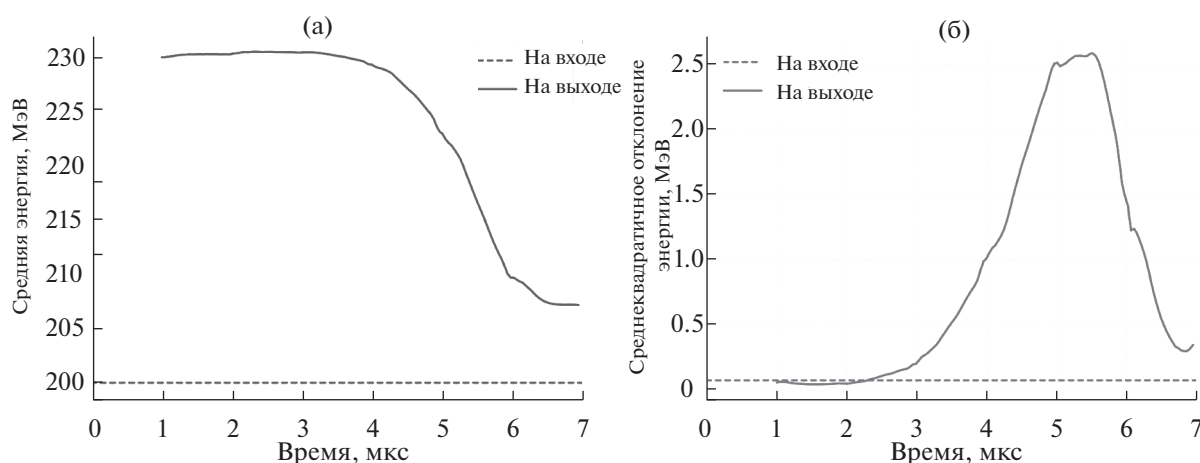


Рис. 2. Зависимости от времени средней энергии сгустка (а) и среднеквадратичного отклонения энергии частиц (б) на выходе TW12.

Параметром, определяющим диапазон эффективного изменения ВЭ и связывающего его с диапазоном необходимого изменения фазы ВЧ поля, является набег фазы центральной частицы сгустка – разность фаз этой частицы при входе и выходе из ускоряющей секции. Этот параметр зависит от длины УС, т.е. числа ячеек в ней. Как видно из рис. 2, быстрое изменение ВЭ происходит при $\phi > 24$, т.е. $\phi + \phi_s > 0$. Условие продольной устойчивости при движении сгустка не выполняется, что ведет к росту разброса частиц по энергии. Такое же возрастание разброса частиц по энергии показано в [2] для регулировки ВЭ в УС СВ. Влияние высших гармоник в распределении ускоряющего поля проявляется, без изменения средних характеристик, в незначительном уширении разброса частиц по энергии.

При регулировке ВЭ и $\phi + \phi_s > 0$, одновременно с потерей устойчивости продольного движения, обеспечивается устойчивость поперечного движения частиц.

На рис. 4 показаны зависимости от времени среднеквадратичного размера и среднеквадратичной расходимости пучка на выходе TW12. Пунктирными линиями показаны соответствующие характеристики пучка на входе TW12. Малые поперечные размеры сгустков – карандашный пучок – при регулировке ВЭ сохраняются. Если ВЭ ЛУ регулируется одной из предыдущих УС БВ, подразумевая отключение последующих структур, то рассчитанная на номинальное ускорение фокусирующая система ЛУ обеспечивает проведение карандашного пучка до выхода ЛУ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как видно из зависимости от времени средней энергии сгустков, рис. 2, применение рассматриваемой методики позволяет реализовать плавное и непрерывное изменение ВЭ пучка от 230 до ~207 МэВ за время ~2.5 мкс. Такая скорость изменения ВЭ недостижима для других способов регулировки. При меньших приращениях фазы $\Delta\phi$

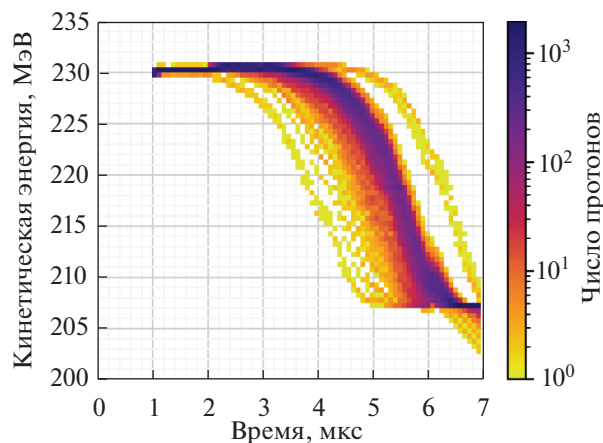


Рис. 3. Гистограмма энергии частиц от времени на выходе TW12.

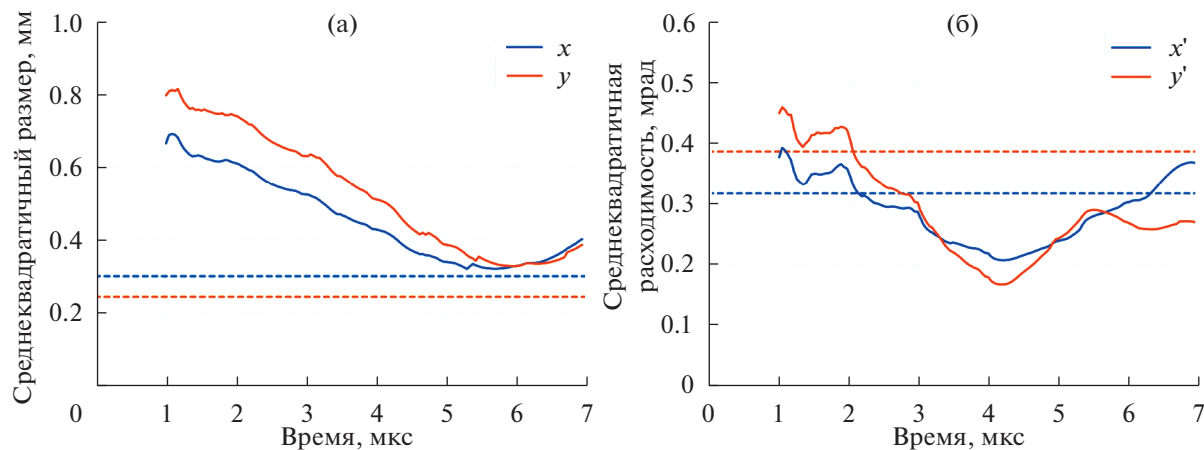


Рис. 4. Зависимости от времени среднеквадратичного размера (а) и среднеквадратичной расходимости пучка (б) от времени на выходе TW12.

процесс регулировки может быть растянут во времени и ограничен только длительностью ВЧ импульса. За счет увеличения разброса частиц сгустка по энергии, сглаживается распределение дозы по глубине.

Принятые в разрабатываемом ЛУ решения предусматривают величину импульсного тока пучка протонов до 2.5 мА, соответствующую $1.5 \cdot 10^{10}$ частиц/сек, что позволяет обеспечить высокую локальную дозу облучения. Комбинация режимов облучения позволит применять разрабатываемый ЛУ как для обычной, так и FLASH протонной терапии. Применение нейронных сетей [8], позволит ускорить решение обратной задачи получения оптимальной зависимости режима ЛУ необходимой для формирования требуемого распределения дозового поля по глубине.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А.А. Коломийцу за предоставленные данные о характеристиках сгустков протонов ЛУ в режиме номинального ускорения. Также авторы выражают благодарность С.М. Полозову за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Degiovanni A., Stabile P., Ungaro D. // Proc. NAPAC'16. 2017. P. 1282–1286.

- https://doi.org/10.18429/JACoW-NAPAC2016-FRB11O02
2. Picardi L. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2020. V. 23 (2). P. 020102. https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.020102
3. Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A. // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 117–119. https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
4. Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A.A., Kurilik A.S., Ovchinnikova L.Yu. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20 (4). P. 850–853. https://doi.org/10.1134/S1547477123040544
5. Xiao C.-C. et al. // Nucl. Sci. Tech. 2020. V. 31. P. 100. https://doi.org/10.1007/s41365-020-00806-6
6. Komarov D.A., Yakushkin E.P., Paramonov Yu.N., Surkov S.V. // Proc. LaPlas-2022. 2022. P. 390. https://conf.laplas.mephi.ru/archive2022/information/.
7. Овчинникова Л.Ю., Парамонов В.В. // Ядерн. физ. инженер. 2025. Т. 16 (2). С. 178. https://doi.org/10.56304/S2079562924050361 [Ovchinnikova L., Paramonov V. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (12). P. 2675–2679. https://doi.org/10.1134/S1063778823110340].
8. Овчинникова Л.Ю., Курилик А.С. // Ядерн. физ. инженер. 2023. Т. 14 (5). С. 453. https://doi.org/10.56304/S2079562922050347 [Ovchinnikova L.Yu., Kurilik A.S. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (10). P. 1658–1660. https://doi.org/10.1134/S1063778822100404].

Features of the Fast Variation of the Output Energy in a Linear Accelerator for Proton Therapy

L. Yu. Ovchinnikova¹ *, A. P. Durkin¹, and V. V. Paramonov¹

¹ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: lubovch@inr.ru

Received May 22, 2024; revised July 25, 2024; accepted July 26, 2024

Abstract—Results of studying processes accompanying the fast variation of the output energy of a medical proton linac during one microwave pulse have been summarized. Features of both the formation of a required

microwave power pulse and the propagation of the microwave pulse in an inertialess dispersed traveling wave structure have been analyzed. Particular attention is paid to beam dynamics in a nonstationary electromagnetic microwave pulse. The application of the variation method under consideration will greatly increase speed of scanning along the depth in an irradiated object.

Keywords: proton therapy, TW linear accelerator, beam dynamics simulation