

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Расчет динамики пучка электронов в ускорителе С-диапазона для комплекса лучевой терапии

Л. Ю. Овчинникова,^{1,2,а} В. И. Шведун^{1,2,б}

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

² *ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ». Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 77.*

Статья поступила 04.07.2018, принята к публикации 06.10.2018.

Выполнен расчет динамики пучка электронов в линейном ускорителе С-диапазона, источнике тормозного излучения с граничной энергией, переключаемой между значениями 2.5 МэВ и 6 МэВ, предназначенном для стереотаксической и трехмерной конформной лучевой терапии в статическом и ротационном режимах.

Ключевые слова: комплекс лучевой терапии, линейный ускоритель электронов, электронная пушка, тормозная мишень, ускоряющая структура, динамика пучка.

УДК: 621.384.6.01. PACS: 29.27.Bd.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе приведены результаты расчета динамики пучка в линейном ускорителе на максимальную энергию 6 МэВ, предназначенном для комплекса лучевой терапии КЛТ6 [1]. Разрабатываемый КЛТ относится к бюджетной версии комплексов, его аналогами являются КЛТ компаний Varian Medical Systems, Inc. — Unique [2], Elekta Instrument AB Stockholm — Compact [3], Philips — СЛ75-5-МТ [4], АО «НИИЭФА» — «Эллус-6М» [5].

К линейному ускорителю КЛТ6 предъявляются следующие требования:

- длина ускорителя — расстояние от тормозной мишени до внешней части радиационной защиты не более 300 мм — определяется разностью расстояний от пола до оси вращения гантри, 1300 мм, и от тормозной мишени до изоцентра — 1000 мм;
- минимальные поперечные размеры ускоряющей структуры для снижения массы радиационной защиты;
- работа последовательно при двух значениях максимума спектра ускоренного пучка электронов 6 МэВ в режиме сообщения терапевтической дозы и 2.5 МэВ в режиме получения портального изображения, снижение энергии необходимо для увеличения контрастности портального изображения;
- работа в режиме поимпульсного переключения энергии между значениями 6 МэВ и 2.5 МэВ при получении портального изображения с целью применения методики оценки плотности тканей и органов;
- максимальная мощность дозы на оси на расстоянии 1 м от тормозной мишени без разравнивающего фильтра при энергии 6 МэВ в режиме сообщения терапевтической дозы не менее 10 Гр/мин;
- диаметр пучка электронов на тормозной мишени не более 2 мм на половине высоты распределения заряда.

Возможность переключения энергии ускоренного пучка электронов в широком диапазоне, в том числе в поимпульсном режиме, а также малые продольные и поперечные размеры ускоряющей структуры отличают разрабатываемый нами ускоритель от ускорителей, использующихся в комплексах [2–5].

В основе ускорителей [2–5], лежат ускоряющие структуры 10 см диапазона длин волн (S-диапазона), значительные размеры которых приводит к определенным недостаткам комплексов.

Так, для обеспечения угла поворота гантри $\pm 180^\circ$ приходится либо делать углубление в полу в области ускорителя [2], либо увеличивать высоту оси вращения [3], либо размещать ускоряющую структуру в наклонном положении с транспортировкой пучка к тормозной мишени с помощью магнитооптического тракта [4, 5].

Также КЛТ [2, 3] могут включать возможность получения портального изображения, однако они не имеют режима работы с пониженной энергией ускоренных электронов, или поимпульсного переключения энергии, что необходимо для получения высокой контрастности портального изображения [6].

С целью достижения заявленных характеристик КЛТ6 нами выбран 5-сантиметровый диапазон длин волн ускоряющего поля (С-диапазон). По сочетанию ряда характеристик ускоряющих структур, а именно: величине эффективного шунтового сопротивления, достижимой максимальной напряженности ускоряющего поля, диаметру пролетного канала, габаритам данный диапазон длин волн является оптимальным для создания компактных ускорителей электронов прикладного назначения на относительно невысокую, не более нескольких киловатт, мощность ускоренного пучка. Освоение С-диапазона длительное время сдерживалось отсутствием подходящих источников СВЧ-энергии. По мере создания клистронов и магнетронов на частоту 5712 МГц с максимальной СВЧ-мощностью 2–5 МВт [7, 8] в различных ускорительных центрах были начаты разработки прикладных линейных ускорителей С-диапазона, главным образом для медицинских целей [9–15].

Разрабатываемый нами ускоритель ориентирован на использование в качестве источника СВЧ-мощности многолучевого импульсного клистронов с реверсной фокусировкой КИУ–273, разработанного АО «НПП «Торий» [16].

^а E-mail: lub.ovch@yandex.ru

^б E-mail: shvedunov@gmail.com

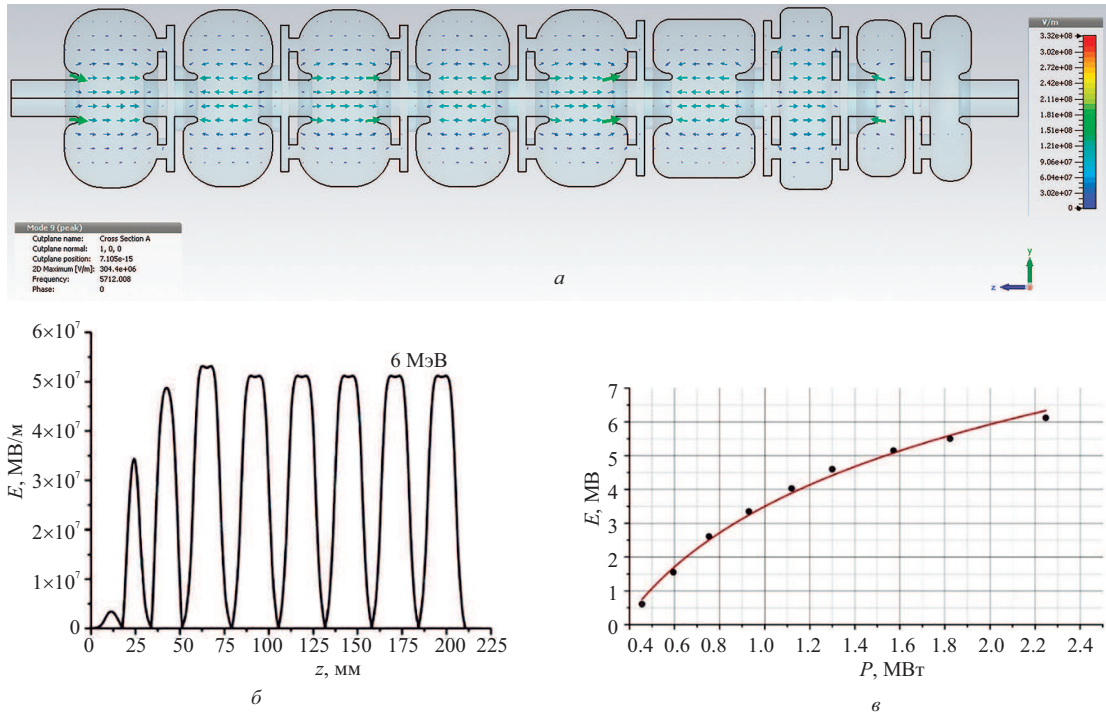


Рис. 1. *a* — Геометрия ускоряющей структуры и картина распределения электрического поля рабочего колебания, *б* — распределение электрического поля на оси, *в* — зависимость прироста энергии от импульсной мощности СВЧ-потерь в стенках

1. ПАРАМЕТРЫ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

В основе ускорителя лежит бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи, работающая на частоте 5712 МГц в режиме стоячей волны, оптимизированная для работы в широком диапазоне энергий ускоренного пучка, разработанная ранее ООО «ЛЭУ МГУ» для ускорителя, инспекционно-досмотрового комплекса [17]. Распределения электрического поля рабочего колебания в объеме структуры и на ее оси показаны на рис. 1, *a* и *б* соответственно.

Начальная часть ускоряющей структуры оптимизирована с целью обеспечения продольной группировки и поперечной фокусировки пучка. Регулирование энергии ускоренного пучка обеспечивается изменением уровня СВЧ-мощности, подаваемой на вход ускоряющей структуры. При по крайней мере двукратном изменении энергии ускоренного пучка значение коэффициента захвата тока электронной пушки в режим ускорения составляет не менее 50%, размер фокусного пятна на тормозной мишени не превышает 2 мм на половине высоты распределения тока. Длина ускоряющей структуры, включая начальную часть, составляет 210 мм. Максимальная напряженность электрического поля на оси при энергии 6 МэВ превышает 50 МВ/м, при этом максимальная напряженность поля на внутренней поверхности достигает 120 МВ/м. Отметим, что предельная напряженность поля на внутренней поверхности структуры, при которой начинается СВЧ-пробой, для данного диапазона частот достигает 400 МВ/м [18]. На рис. 1, *в* приведена расчетная связь энергии ускоренного пучка с мощностью СВЧ-потерь в стенках. Для получения энергии 6 МэВ мощность СВЧ-потерь должна составлять около 2.3 МВт, энергия 2.5 МэВ достигается при СВЧ-потерях около 0.8 МВт.

Прототип данного ускорителя [17] рассчитан на получение максимальной мощности дозы тормозного

излучения на оси на расстоянии 1 м от мишени $D = 0.6$ Гр/мин при скважности $Q = 840$. Для проекта КЛТ6 мощность дозы должна быть увеличена почти в 20 раз при той же скважности.

Импульсный ток ускоренного пучка, необходимый для получения заданной мощности можно оценить на основе эмпирической формулы для мощности дозы тормозного излучения под углом 0° на расстоянии 1 м от тормозной мишени [19]:

$$D \approx 0.33E^3 I_{\text{pulse}}/Q \text{ (Гр/мин)}, \quad (1)$$

где E — энергия электронного пучка на тормозной мишени (МэВ), I_{pulse} — импульсный ток пучка (мА). Для значений $E = 6$ МэВ, $Q = 840$, $D = 10$ Гр/мин получаем $I_{\text{pulse}} \approx 120$ мА. Данная величина тока ускоренного пучка может быть получена при токе инжекции от электронной пушки $I_{\text{gun}} \approx 250 - 300$ мА.

2. ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА

Для получения проектной мощности дозы 10 Гр/мин при энергии 6 МэВ и поперечном размере пучка на тормозной мишени, соответствующем требованиям технического задания, была проведена оптимизация геометрии трехэлектродной электронной пушки. Критерием достижения оптимальной геометрии служило соответствие параметров ускоренного пучка на тормозной мишени требованиям технического задания. Расчеты проводились с помощью программы CST [20].

Конструкция электронной пушки, оптимизированной для КЛТ6, показана на рис. 2, *a*. В пушке использован катод диаметром 4 мм с радиусом сферы 5 мм и плоский управляющий электрод. На рис. 2, *б, в* соответственно показаны в зависимости от напряжения на управляющем электроде ток пучка и среднеквадратичный радиус на входе в первую ускоряющую ячейку.

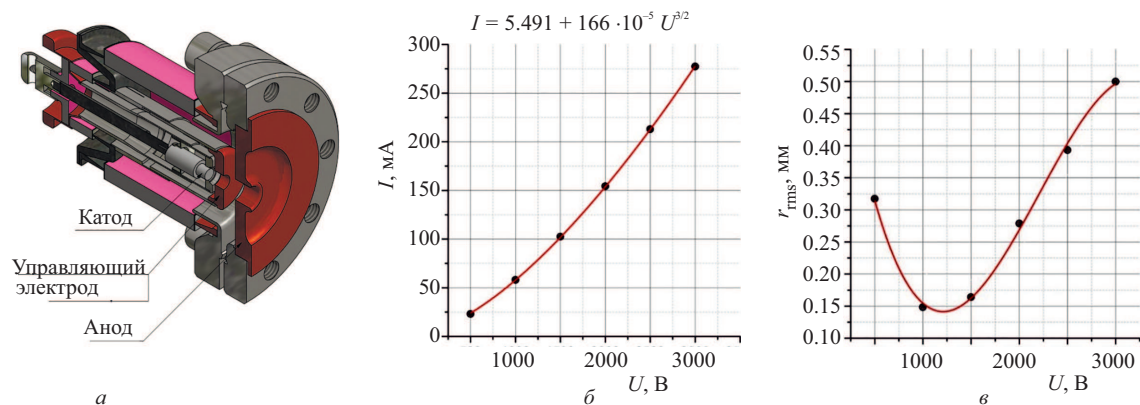


Рис. 2. *a* — Конструкция электронной пушки ускорителя для КЛТ6, *б* — ток пучка, *в* — среднеквадратичный радиус на входе в первую ускоряющую ячейку в зависимости от напряжения на управляющем электроде

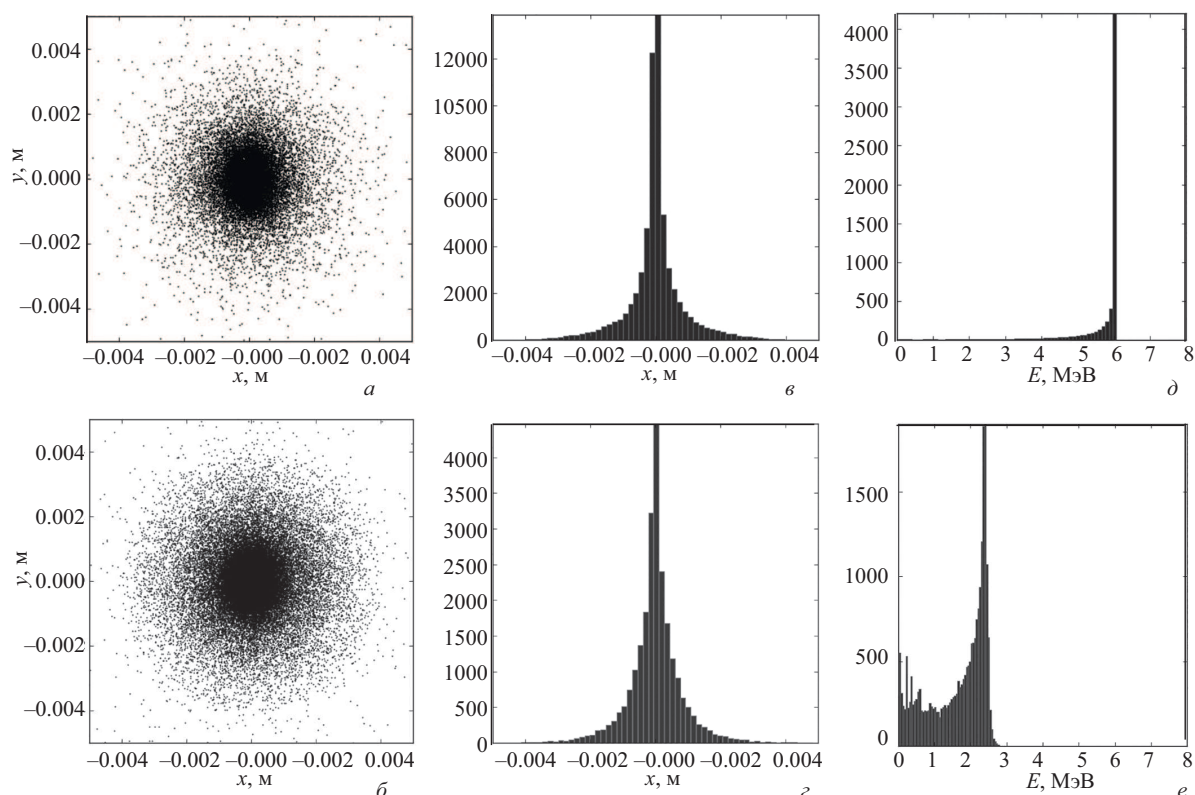


Рис. 3. Портреты (*a*, *б*), гистограммы распределения тока в поперечной плоскости (*в*, *г*), энергетические спектры пучка (*д*, *е*) на тормозной мишени для энергии 6 МэВ (верхний ряд) и 2.5 МэВ

Значение тока, необходимое для получения мощности дозы 10 Гр/мин, достигается при напряжении на управляющем электроде относительно катода менее 3 кВ. На входе в ускоряющую структуру пучок имеет среднеквадратичный радиус не более 0.6 мм и умеренную расходимость, что должно обеспечить его ускорение с малыми потерями в пролетном канале диаметром 8 мм.

3. ДИНАМИКА ПУЧКА В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ

Расчет динамики пучка в ускоряющей структуре с электронной пушкой, описанной в предыдущем разделе, также выполнялся с помощью программы CST [20]. На рис. 3 приведены рассчитанные портреты и гистограммы распределения тока и энергетические спектры на тормозной мишени для энергий ускорен-

ного пучка 6 МэВ и 2.5 МэВ. Основные результаты расчета суммированы в [таблице](#).

Из расчетов следует, что для обеих энергий необходимая мощность дозы, рассчитанная с учетом энергетического спектра ускоренных электронов, может быть получена при одинаковом напряжении на управляющем электроде, около 3 кВ, обеспечивающем ток пушки 245 мА. Регулирование мощности дозы при необходимости может осуществляться за счет изменения скважности (длительности импульса) тока пучка или частоты следования импульсов).

4. ТОРМОЗНОЙ СПЕКТР

При вертикальном размещении ускоряющей системы на тормозную мишень попадают все частицы, вышедшие из ускорителя, включая частицы с энергией, существенно отличающейся от энергии пика спектрального

Таблица. Основные результаты расчета динамики пучка для энергий 6 МэВ и 2.5 МэВ

Характеристика	6 МэВ	2.5 МэВ
Доза для скважности 840, Гр/мин	10.5	0.37
Инжектируемый ток в структуру, мА	245	245
Ускоренный ток, мА	150	124
Коэффициент захвата, %	60	50
Среднеквадратичный радиус пучка, мм	0.7	0.84
Среднеквадратичная расходимость, мрад	8.2	29
Ширина энергетического спектра, кэВ	100	500
Затраты СВЧ-мощности на создание поля, МВт	2.3	0.8
Импульсная мощность ускоренного пучка, МВт	0.9	—

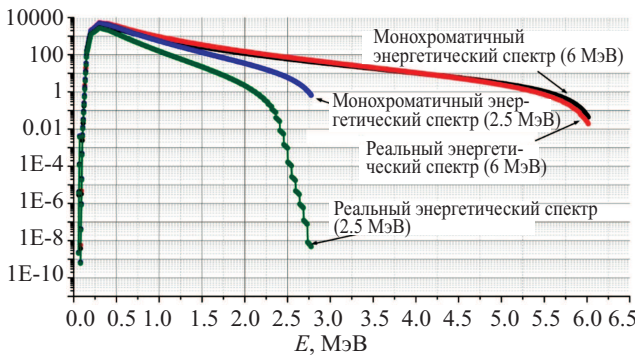


Рис. 4. Тормозные спектры для энергий 6 МэВ и 2.5 МэВ

распределения электронов, что должно учитываться при планировании облучения и получения портального изображения.

На рис. 4 приведены спектры тормозного излучения под углом 0° , рассчитанные на основании формулы Шиффа [21] для режима работы ускорителя с энергиями 6 МэВ и 2.5 МэВ, как с учетом спектрального распределения электронов (рис. 3, д, е), так и для монохроматических пучков с энергией соответствующей энергии пика спектрального распределения электронов. Учет спектрального распределения электронов проводился в соответствии с формулой:

$$S_{\text{eff}}(k) = \sum_{i=1}^{N_H} \alpha_i S(E_i, k), \quad (2)$$

где $S(E_i, k)$ — спектр тормозного излучения для монохроматического пучка электронов с энергией E_i , соответствующей i -му шагу гистограммы спектрального распределения электронов, k — энергия фотона,

N_H — число разбиений гистограммы, α — доля электронов с энергией E_i в спектральном распределении, $\sum_{i=1}^{N_H} \alpha_i = 1$.

Как можно видеть из рис. 4 форма спектра тормозного излучения, генерируемая немонохроматическим пучком электронов для энергии 6 МэВ, близка к форме спектра для монохроматического пучка. Для энергии 2.5 МэВ спектр получается заметно более мягким, чем для монохроматического пучка, что важно для получения высокой контрастности изображения и снижения дозы передаваемой пациенту при получении изображений.

5. ПАРАЗИТНЫЕ ПОТЕРИ ТОКА ПУЧКА

Частицы, не захваченные в режим ускорения, оседают на стенках пролетного канала и внутренней поверхности ускоряющей структуры, генерируя паразитную радиацию. Часть частиц возвращается назад в прикатодную область пушки, не только производя паразитное излучение, но и дополнительно разогревая катод. Информация о частицах, не захваченных в режим ускорения, необходимая для расчета радиационной защиты и теплового режима катода, была получена в процессе расчета динамики пучка с помощью программы CST [20].

При энергии 6 МэВ, токе инжекции около 245 мА ток на выходе ускоряющей структуры составляет около 150 мА, потери тока — около 95 мА, из которых около 40 мА возвращается на катод (эффект обратной бомбардировки). На рис. 5 приведено распределение частиц на катоде и спектр частиц, возвращающихся на катод. Импульсная тепловая мощность, выделяющаяся на катоде за счет эффекта обратной бомбардировки, составляет около 8.8 кВт, импульсная мощность дозы тормозного

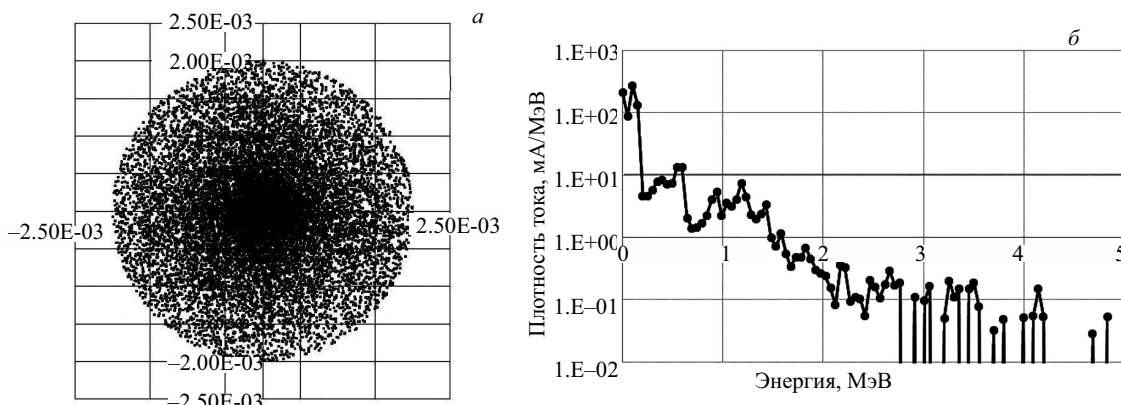


Рис. 5. Распределение частиц на катоде (а) и спектр частиц, возвращающихся на катод (б)

излучения, генерируемого на катоде, — около 4 Гр/мин. При скажности 840 средние значения тепловой мощности и мощности дозы составляют соответственно 10 Вт и 4.8 мГр/мин. Указанные значения существенны и должны учитываться при проектировании цепи накала катода и радиационной защиты ускорителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены расчеты динамики пучка электронов в ускорителе электронов С-диапазона комплекса лучевой терапии КЛТ6, предназначенном для генерации тормозного излучения с граничной энергией, переключаемой между значениями 2.5 МэВ и 6 МэВ для процедур стереотаксической и трехмерной конформной лучевой терапии в статическом и ротационном режимах.

Авторы выражают благодарность Н. В. Шведуну за разработку конструкции электронной пушки и ускоряющей структуры, А. С. Симонову за полезные обсуждения и консультации, а также профессору Б. С. Ишханову и академику РАН В. П. Смирнову за поддержку проекта.

Результаты расчетов использованы при разработке конструкции ускорителя. Работа подготовлена в рамках выполнения соглашения между Минобрнауки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии от 03.10.17 г. № 14.582.21.0011 «Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соглашение между Минобрнауки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии от 03.10.17 г. № 14.582.21.0011 Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

2. <https://www.varian.com/en-au/oncology/products/treatment-delivery/unique-system>
3. <https://www.elekta.com/radiotherapy/treatment-delivery-systems/elekta-compact>
4. Лебедево И. М., Староверов О. В., Журов Ю. В. и др. // Медицинская физика. 2009. № 1. С. 15.
5. Budtov A.A., Vorogushin M.F., Shyshov V.A. et al. ELLUS-6M Linear Electron Accelerator for Radiotherapy // Proceedings of RuPAC-2010. P. 405.
6. Roberts D., Hansen V., Thompson M. et al. // Med. Phys. 2012. **39**. P. 1218.
7. Yano A., Ohkubo Y. Design Consideration to PPM Klystrons for Industrial Linac // Proceedings of LINAC2002. P. 464.
8. C-Band Coaxial Pulsed Magnetron <http://www.cpii.com/docs/datasheets/291/VMC3109%20datasheet%20120513.pdf>
9. Tanabe E., Fineberg Y., Matsumoto H., Shintake T. Medical Applications of C-Band Accelerator Technologies // LINAC98 Papers. P. 627.
10. El-Ashmawy M., Uesaka M., Iijima H. et al. Overall Quality Comparison of C-Band and X-Band Medical Linacs // Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology. 2003.
11. Hirai E., Tsukuda K., Kamino Y. et al. // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2009. **46**, N 1. P. 29.
12. Yang H., Kim S., Jang S. et al. Commissioning of C-band Standing-wave Accelerator // Proceedings of IPAC'10. P. 3753.
13. Shao J., Du Y., Zha H. et al. // Phys. Rev. Accelerators and Beams. 2013. **16**, N 9. 090102.
14. Bai W., Li M., Shan L. et al. Latest Developments of a C-band 2MeV Accelerator // Proceedings of IPAC2014. P. 2165.
15. Kim S., Kang S., Rhee D. et al. // Progress in Medical Physics. 2015. **26**, N 1. P. 1.
16. АО «НПП «Торий»». <http://www.toriy.ru>.
17. Ускоритель электронов С-диапазона для мобильного инспекционно-досмотрового комплекса УЭЛР-6-0.2-Д-0.6-1. // ТУ 6912-001-17697883-2017. 2017.
18. Loew G.A., Wang J.W. // Part. Accel. 1989. **30**, N SLAC-PUB-5059. P. 225.
19. Swanson W.P. // IAEA Technical Reports Series. 1979. N 188.
20. CST — Computer Simulation Technology. <http://www.cst.com>.
21. Schiff L.I. // Phys. Rev. 1951. **83**, N 2. P. 252, формула (1).

Calculation of Electron-Beam Dynamics in a C-Band Accelerator for a Radiotherapy Complex

L. Yu. Ovchinnikova^{1,2,a}, V. I. Shvedunov^{1,2,b}

Lomonosov Moscow State University

¹Skobel'syn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU). 1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia.

²Laboratory of Electron Accelerators MSU Ltd. Moscow 119992, Russia.

E-mail: ^alub.ovch@yandex.ru, ^bshvedunov@gmail.com.

The dynamics of the electron beam in a C-band linear accelerator, a bremsstrahlung source with a boundary energy switched between 2.5 MeV and 6 MeV, which is intended for stereotactic and three-dimensional conformal radiotherapy in static and rotational modes, was calculated

Keywords: radiation therapy complex, linear electron accelerator, electron gun, bremsstrahlung target, accelerating structure, beam dynamics.

PACS: 29.27.Bd.

Received 04 June 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **73**, No. 6. Pp. 599–604.

Сведения об авторах

1. Овчинникова Любовь Юрьевна — мл. науч. сотрудник; тел.: +7(495)939-24-51, e-mail: lub.ovch@yandex.ru.

2. Шведун Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; тел.: +7(495)939-24-51, e-mail: shvedunov@gmail.com.