

Разработка линейного ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии. II Снижение напряженности ускоряющего поля, повышение эффективности ускоряющей структуры

Д.С. Юров,^{1,2,*} М.А. Борисов,^{2,3,†} А.С. Алимов,^{1,2,‡} С.З. Багова,^{4,§} А.Н. Ермаков,^{1,2}
А.Н. Каманин,^{1,2} Т.К. Лобжанидзе,⁴ Н.И. Пахомов,^{1,2} А.С. Симонов,²
В.А. Ханкин,^{1,2} В.И. Шведун,^{1,2} И.В. Шведун,² Н.В. Шведун,^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

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

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

⁴АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации»
Россия, 115230, Москва, Варшавское ш., д. 46

(Поступила в редакцию 26.06.2024; подписана в печать 26.07.2024)

Вторая часть статьи о разработке линейного ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии «Оникс» посвящена решению проблем, связанных с высокой напряженностью электрического поля в ускоряющей структуре, к числу которых можно отнести высокие темновые токи, долгий процесс тренировки, большие затраты импульсной СВЧ-мощности на омические потери в стенках структуры, ее низкую эффективность. В статье приведены шаги, предпринятые нами для уменьшения величины электрического поля и роста эффективности ускоряющей структуры. Показаны основные результаты испытаний характеристик тормозного излучения для финального варианта ускоряющей структуры.

PACS: 87.56.bd. УДК: 53.06.

Ключевые слова: линейные ускорители электронов, лучевая терапия, ускоряющая структура, динамика пучка, напряженность электрического поля.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2451002](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2451002)

ВВЕДЕНИЕ

АО «НИИТФА» с 2017 г. ведет разработку отечественного комплекса лучевой терапии «Оникс». Опытный образец линейного ускорителя для данного комплекса был разработан в рамках НИР Лабораторией электронных ускорителей МГУ совместно с НИИЯФ МГУ [1–8].

В предыдущей статье [9], посвященной решению эффекта обратной бомбардировки катода, приведена спецификация параметров тормозного излучения комплекса лучевой терапии, описана методика оптимизации, приведены результаты испытаний экспериментального образца ускоряющей системы.

В данной статье описано решение проблемы высокой напряженности ускоряющего поля и повышения эффективности ускоряющей структуры. Проанализировано влияние окна связи ячейки узла ввода мощности на положение пучка на тормозной мишени. Методика расчета и оптимизации ускоряющей системы с помощью программ Daln [10] и CST Studio Suite [11] описана в предыдущей статье [9].

1. ПРОБЛЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОБОВ

Вертикальное размещение ускоряющей системы в гантри медицинского ускорителя при стандартном расстоянии от тормозной мишени до изоцентра, составляющем 1 м, наличии радиационной защиты со стороны электронной пушки, заданном расстоянии от пола до изоцентра накладывает жесткие ограничения на длину ускоряющей системы. На опытном образце ускоряющей системы длина ускоряющей структуры, состоящей из 9 ускоряющих ячеек, составляла около 210 мм, при этом темп набора энергии в регулярной части структуры достигал 35 МэВ/м. Высокая напряженность электрического поля на поверхности структуры, превышающая 180 МВ/м, приводила к появлению значительного темнового тока, длительному времени тренировки, которая, тем не менее, не позволяла полностью избавиться от одиночных высокочастотных пробоев даже при весьма высоком качестве обработки поверхности [7].

В рамках настоящей работы была проведена оптимизация ускоряющей структуры с целью снижения максимальной напряженности ускоряющего поля на ее поверхности за счет добавления ускоряющей ячейки с одновременным изменением геометрии начальной части структуры, а также за счет

* E-mail: d_yurov88@mail.ru

† E-mail: muchmaxx@gmail.com

‡ E-mail: alim8591@gmail.com

§ E-mail: bagova2009@yandex.ru

изменения геометрии носиков ускоряющей структуры. Общая длина ускоряющей системы при этом стала на 2 мм короче благодаря изменению конструкции электронной пушки.

2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Измерения, выполненные с опытным образцом ускоряющей системы, показали, что для достижения энергии 6 МэВ в максимуме спектра ускоренного пучка необходимы затраты СВЧ-мощности около 2.3 МВт, что близко к расчетному значению [1–3]. С другой стороны, для достижения мощности дозы тормозного излучения в направлении вперед, равной 10 Гр/мин, при скважности 840, определяемой параметрами модулятора, импульсная мощность пучка должна составлять около 0.7 МВт. Таким образом, при отсутствии отраженной волны на вход ускоряющей структуры необходимо подавать около 3 МВт СВЧ-мощности. Наличие отраженной волны, неизбежные потери мощности в элементах СВЧ-тракта, увеличение скважности по току ускоренного пучка из-за конечного времени установления ускоряющего поля, требуют СВЧ-мощности на выходе клистрона на уровне 3.3–3.4 МВт. Согласно паспортным данным на клистрон КИУ-273, используемый в настоящем проекте, он обеспечивает максимальную СВЧ-мощность в диапазоне 3.2–3.4 МВт, т.е. его мощность находится на пределе требуемого значения.

Как показал анализ публикаций по результатам измерений и расчетов отношения ткань–фантом, $TPR_{20,10}$, определяющего проникающую способность тормозного излучения, для достижения величины $TPR_{20,10} \approx 0.64$ без выравнивающего фильтра значение энергии максимума спектра пучка электронов должно быть заметно выше 6 МэВ, причем это значение энергии существенно зависит от формы спектра [12]. Таким образом, СВЧ-мощности клистрона недостаточно для получения на опытном образце проектной величины $TPR_{20,10}$ при максимальной мощности дозы, что требует снижения затрат СВЧ-мощности на создание ускоряющего поля.

Затраты СВЧ-мощности на создание ускоряющего поля в регулярной ускоряющей структуре (мощность СВЧ-потерь в стенках ускоряющей структуры) определяются соотношением:

$$P_w = \frac{(\Delta E)^2}{Z_{eff}L} \quad (1)$$

где ΔE — прирост энергии, Z_{eff} — погонное эффективное шунтовое сопротивление, L — длина ускоряющей структуры. Одним из факторов снижения затрат СВЧ-мощности является увеличение длины структуры за счет добавления ускоряющей ячейки. Другим фактором, который также был использован в данной работе, является увеличение погонно-

го эффективного шунтового сопротивления ускоряющей структуры за счет изменения ее геометрии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Успешное решение проблемы обратной бомбардировки катода позволило перейти к следующему этапу оптимизации ускоряющей структуры — снижению напряженности поля и повышению эффективности. При этом геометрию электродов электронной пушки было решено оставить неизменной.

Снижение максимальной напряженности электрического поля на поверхности структуры было достигнуто в первую очередь за счет добавления регулярной ускоряющей ячейки при сохранении общей длины ускоряющей системы, благодаря сокращению длины электронной пушки. Кроме того, была изменена геометрия носиков ускоряющих ячеек, что позволило без снижения эффективного шунтового сопротивления дополнительно снизить максимальную напряженность ускоряющего поля на поверхности структуры.

Увеличение длины ускоряющей структуры снижает затраты СВЧ-мощности на создание ускоряющего поля (формула (1)). Дополнительное снижение затрат СВЧ-мощности было достигнуто за счет уменьшения радиуса пролетного канала регулярных ячеек.

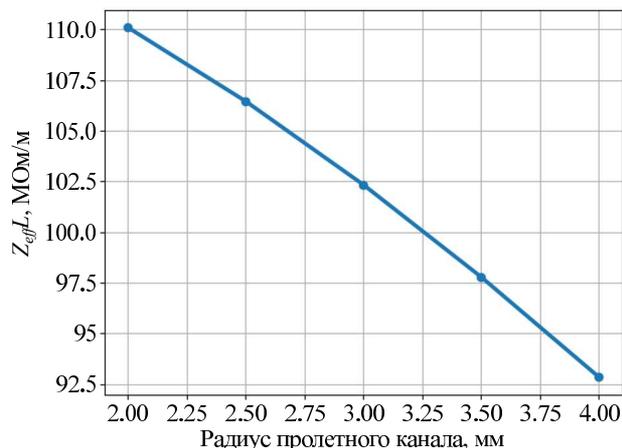


Рис. 1. Зависимость погонного эффективного шунтового сопротивления регулярной ячейки от радиуса пролетного канала

На рис. 1 показана зависимость погонного эффективного шунтового сопротивления регулярной ячейки от радиуса пролетного канала. Ускоряющие структуры опытного [1–3] и экспериментального [9] образцов ускоряющей системы имели радиус пролетного канала 4 мм. В окончательном варианте ускоряющей структуры было принято решение уменьшить радиус пролетного канала регулярных

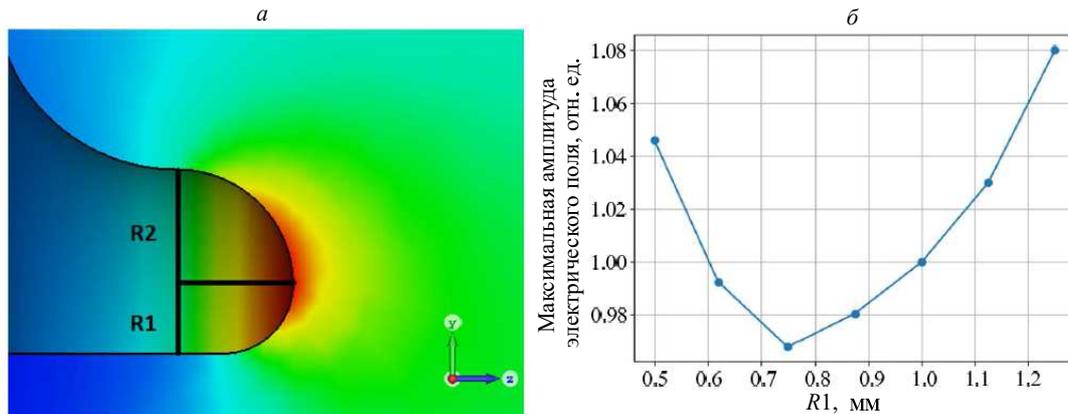


Рис. 2. *a* — Электрическое поле вблизи носика с различными радиусами скругления верхней и нижней частей. *б* — Изменение максимальной напряженности электрического поля в зависимости от радиуса $R1$

ячеек до 3 мм, что снижает примерно на 10% затраты СВЧ-мощности на создание ускоряющего поля.

Максимальная напряженность электрического поля в ускоряющих ячейках достигается на их носиках. Для снижения напряженности поля были введены два различных радиуса скругления носика, как это показано на рис. 2, *a*, из которого следует, что максимум электрического поля смещен в сторону верхней его половины. Для поиска оптимального варианта варьировался радиус $R1$. Радиус $R2$ рассчитывался как разность толщины носика и радиуса $R1$. Зависимость максимальной напряженности электрического поля на поверхности носика от радиуса $R1$ показана на рис. 2, *б*, на основании которой радиус $R1$ был выбран равным 0.75 мм. При такой асимметрии носика, согласно расчету, максимальная напряженность электрического поля должна уменьшиться на 3.3% по сравнению с исходным вариантом.

Из-за уменьшения радиуса пролетного канала необходимо было заново проводить расчеты регулярной части ускоряющей структуры в соответствии с процедурой, описанной в [9]. В процессе оптимизации большее внимание было уделено получению распределения ускоряющего поля без выделяющихся амплитуд в отдельных ячейках. Помимо этого, были проведены расчеты структуры с разным радиусом пролетного канала первых двух ячеек. В результате оптимальным вариантом оказалась структура с радиусами пролетного канала в первых двух ячейках 4 мм и 3 мм в остальных. При таком выборе радиусов меньшее количество частиц оседало на стенках в процессе формирования пучка. При оптимизации распределения поля предпочтение отдавалось тем вариантами, которые обеспечивали низкоэнергетический пучок, необходимый для получения порталного изображения с узким энергетическим спектром при высоком коэффициенте захвата. Так как распределение поля оптимизировалось на основе уже рассчитанного ранее потока электронов из пушки, геометрия ее электродов осталась без изменений.

Геометрия окончательного варианта ускоряющей

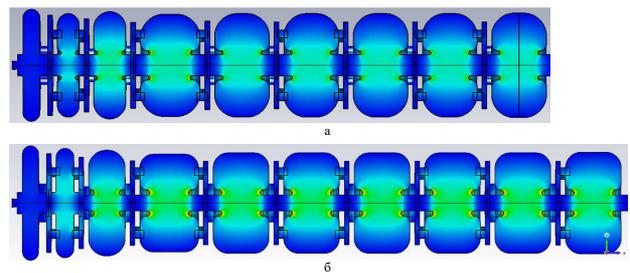


Рис. 3. Сравнение геометрий ускоряющих структур (экспериментального (*a*) и окончательного (*б*) вариантов

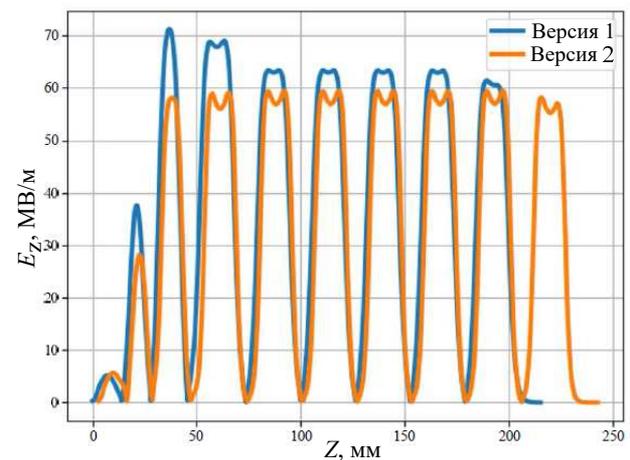


Рис. 4. Сравнение распределения ускоряющего поля на оси экспериментального (Версия 1) и окончательного (Версия 2) вариантов

структуры представлена на рис. 3 в сравнении с геометрией экспериментального образца [9]. Распределение поля на оси показано на рис. 4. Сравнение их характеристик представлено в табл. 1. Из рисунка и таблицы видно, что добавление одной регулярной ячейки позволило снизить амплитуду поля в регулярной части с 63.3 МВ/м до 59.4 МВ/м. Также благодаря лучшей оптимизации начальной части

Таблица 1. Сравнение характеристик экспериментального (Версия 1) [9] и окончательного (Версия 2) вариантов ускоряющей структуры

Параметры	Версия 1	Версия 2
Общая длина, мм	205.19	229.83
Рассеиваемая мощность, МВт	2.21	1.86
Максимальная амплитуда электрического поля на оси, МВ/м	71.2	59.6
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности структуры, МВ/м	189.9	134.4

Таблица 2. Сравнение результатов расчета динамики пучка экспериментального (Версия 1) [9] и окончательного (Версия 2) вариантов ускоряющей системы

Параметры	Версия 1	Версия 2
Коэффициент захвата, %	77.5	78.3
Обратный поток, %	2.1	1.8
Частиц $E < 5.7$ МэВ, %	10.91	8.96
Разброс по энергии, МэВ	0.79	0.69
Рабочий ток пушки, мА	200	195
% оседающих на катоде	0.9	0.69
% попадающих в отверстие катода	1.2	1.21
% оседающих на апертуре	7.4	7.3

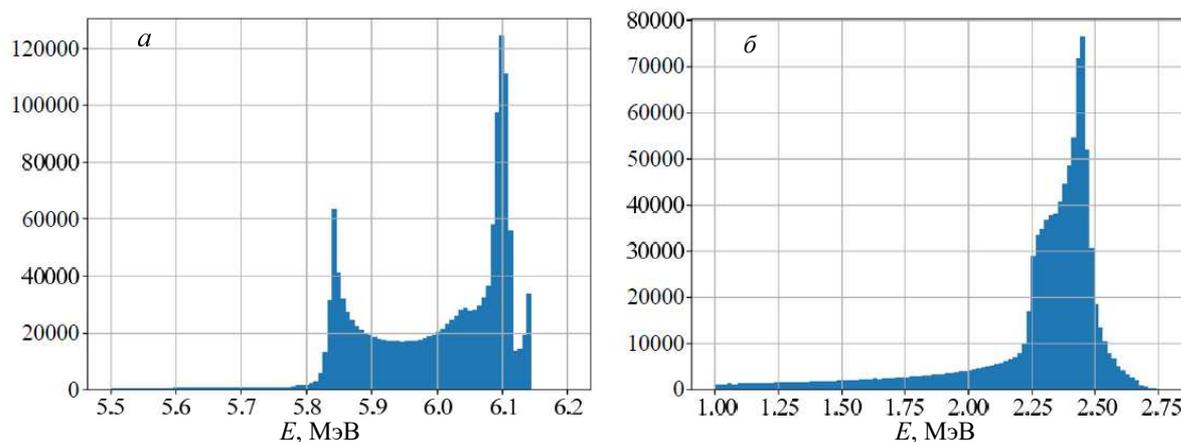


Рис. 5. Энергетические спектры ускоренного пучка при различных уровнях ускоряющего поля: *a* — режим высокой энергии, *б* — режим низкой энергии

максимальная амплитуда поля на оси в ней была уменьшена с 71.2 МВ/м до 59.6 МВ/м. Максимальная напряженность поля на поверхности структуры уменьшена с 189.9 МВ/м до 134.4 МВ/м, что должно существенно снизить величину темновых токов и уменьшить вероятность пробоев. Добавление дополнительного резонатора вместе с уменьшением радиуса пролетного канала позволило сократить расчетную рассеиваемую мощность в структуре с 2.21 МВт до 1.86 МВт, что снижает требования к мощности источника СВЧ-энергии.

Результаты расчета динамики пучка в сравнении с экспериментальной ускоряющей системой представлены в табл. 2. Небольшие улучшения ал-

горитма оптимизации позволили найти вариант с несколькими лучшими характеристиками пучка при том, что радиус пролетного канала был уменьшен.

На рис. 5, *a, б* представлены энергетические спектры пучка на тормозной мишени в режимы высокой и низкой энергии соответственно. Как видно, энергетический разброс достаточно мал как для высокой, так и для низкой энергий.

На рис. 6, *a* показана зависимость коэффициента захвата от средней энергии пучка на выходе при фиксированном напряжении на управляющем электроде и от напряжения на управляющем электроде при фиксированной амплитуде поля в ускоряющей структуре, соответствующей средней энергии пуч-

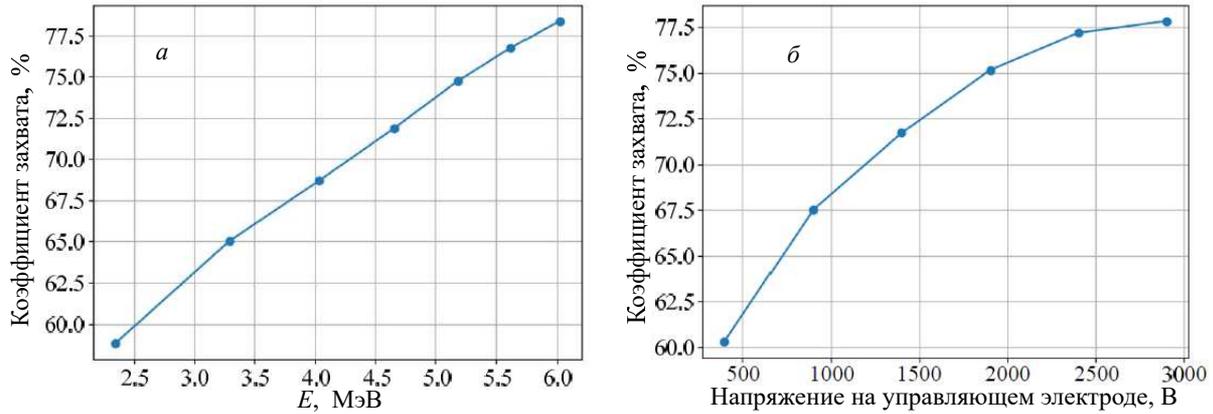


Рис. 6. Зависимость коэффициента захвата (а) от средней энергии пучка на выходе и (б) от напряжения на управляющем электроде для средней энергии 6 МэВ

ка 6 МэВ.

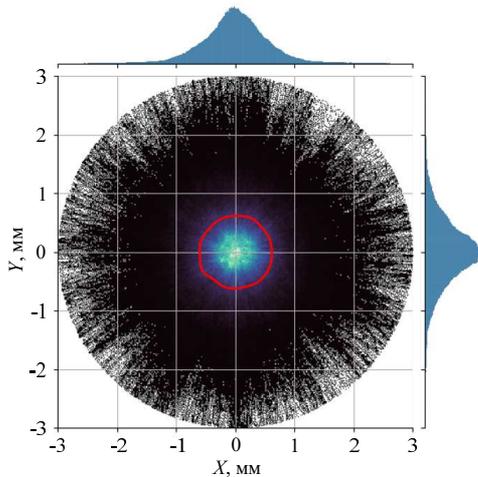


Рис. 7. Поперечное распределение частиц на тормозной мишени. В красной области находится 50 % частиц

На рис. 7 представлено поперечное распределение частиц пучка на тормозной мишени. Вследствие уменьшения диаметра пролетного канала его среднеквадратичный размер был уменьшен, но тем не менее он все же превышает размер пучка опытного образца ускоряющей системы [1–3]. Как следует из табл. 2, несмотря на уменьшение радиуса пролетного канала, коэффициент захвата не снизился.

4. РАСЧЕТЫ УЗЛА ВВОДА МОЩНОСТИ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ДИНАМИКУ ПУЧКА

Для каждого из рассмотренных выше вариантов ускоряющей структуры было рассчитано окно связи узла ввода СВЧ-мощности, внешний вид которого представлен на рис. 8. Оптимальный коэффициент связи рассчитывался по формуле [13]:

$$\beta = 1 + \frac{P_b}{P_a}, \quad (2)$$

где β — коэффициент связи, P_b — мощность пучка, P_a — мощность, рассеиваемая в структуре.

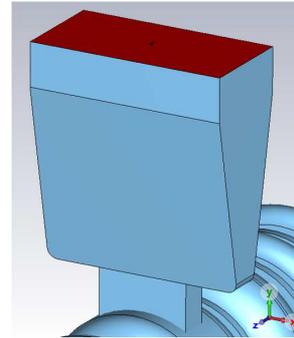


Рис. 8. Внешний вид узла ввода мощности

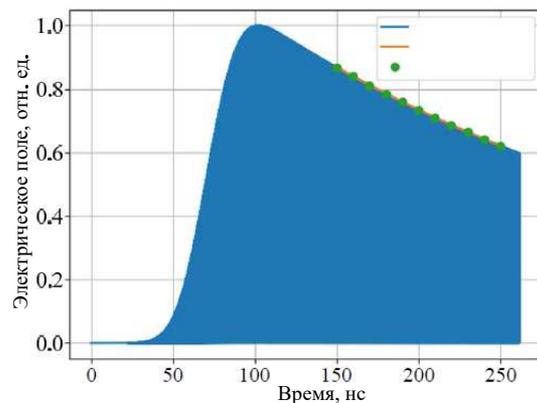


Рис. 9. Зависимость нормированной амплитуды поля в структуре от времени

Для расчета коэффициента связи были использованы два подхода. В первом используется имеющийся в программе CST Studio Suite режим расчета с учетом потерь (eigenmode lossy), позволяющий рассчитывать внешнюю добротность и тем самым вычислять коэффициент связи. Второй метод, давно использующийся для целей расчета окон связи,

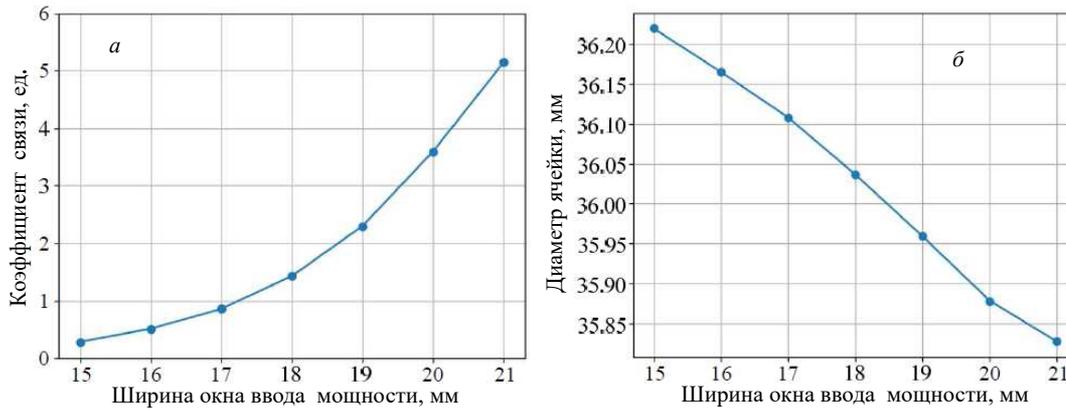


Рис. 10. *а* — Зависимость коэффициента связи от ширины окна ввода мощности; *б* — подстройка диаметра ячейки в соответствии с шириной окна ввода мощности

заключается в том, что на вход в узел ввода мощности подается электромагнитная волна с гауссовой временной зависимостью амплитуды, заполняющая энергией ускоряющую структуру, по окончании которой определяется постоянная времени высвечивания поля через окно связи.

Для расчета по второму методу нами использовался метод Time domain solver с шестигранной расчетной сеткой. Дисперсия входного сигнала выбиралась достаточной для возбуждения основной моды без точного знания ее частоты, но не возбуждающей соседние моды. На рис. 9 представлена зависимость амплитуды поля в регулярной ячейке от времени. В течение времени от 0 до 100 нс происходит нарастание поля под действием возбуждающего сигнала. По мере его затухания начинается спад поля, обусловленный излучением накопленной в структуре энергии через окно связи.

После некоторого времени, необходимого для выхода на установившийся режим, производится определение постоянной времени спада поля $\tau_{\text{внеш}}$ посредством аппроксимации амплитуды экспоненциальной зависимостью (формула (3), оранжевая линия на рис. 9) и вычисление добротности и коэффициента связи по формулам (4) и (5):

$$A = A_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{внеш}}}}, \quad (3)$$

$$Q = \pi f \tau_{\text{внеш}}, \quad (4)$$

$$\beta = Q_0 / Q_{\text{внеш}}, \quad (5)$$

где f — частота, A — амплитуда поля, $\tau_{\text{внеш}}$ — постоянная времени затухания поля, Q_0 — собственная добротность.

С помощью данного метода для выбранного размера окна связи рассчитанный коэффициент связи составил 1.79, в то время как прямой расчет по модулю eigenmode lossy дал величину 1.75.

Таким образом, оба метода дают близкие с практической точки зрения результаты, но метод с использованием модуля eigenmode lossy работает гораздо быстрее, что позволяет также подстраивать

частоту ячейки узла ввода мощности одновременно с изменением ширины окна связи. В качестве примера на рис. 10, *а* представлена зависимость коэффициента связи от ширины окна связи и на рис. 10, *б* соответствующее этой ширине значение диаметра ячейки.

Наличие окна связи в ячейке узла ввода мощности вносит асимметрию в ее геометрию и влияет на положение пучка на выходе из ускоряющей структуры из-за появления дипольной компоненты поля. Смещение пятна пучка относительно центра мишени наблюдалось, в частности, на опытном образце ускоряющей системы (см. рис. 11). Отметим, что во избежание воздействия на пучок паразитных магнитных полей ускоряющая система, включая электронную пушку и ускоряющую структуру, помещена в магнитный экран.



Рис. 11. Разрез опытной ускоряющей структуры в области тормозной мишени. Диаметр тормозной мишени из вольфрама 6 мм, диаметр кратера от пучка около 1 мм

Основываясь на результатах расчета распределений электрического и магнитного полей в ускоряющей ячейке с окном связи, был сделан вывод, что именно магнитное поле играет решающую роль. На рис. 12 представлено распределение магнитного поля в плоскости $Y-Z$, демонстрирующее наличие дипольной компоненты магнитного поля на оси ускоряющей структуры, которая приводит к смещению пучка в плоскости, перпендикулярной оси волново-

да. Для оценки смещения в программу Daln [10] импортировалось распределение поля начальной части и далее поочередно добавлялись регулярные ячейки. На вход подавался поток электронов цилиндрической формы. Зависимость смещения пучка (медианы пучка по оси Y) от количества регулярных ячеек представлена на рис. 13. Наблюдаемое увеличение смещения пучка связано с увеличением расстояния от узла ввода мощности до точки наблюдения по мере добавления ячеек. Уменьшение скорости роста обусловлено ростом продольного импульса частиц.

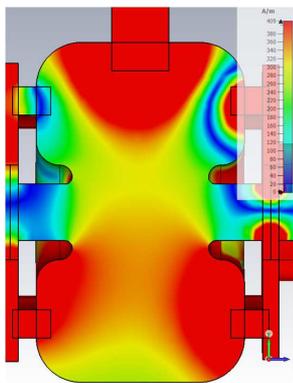


Рис. 12. Распределение магнитной компоненты поля в ячейке с узлом ввода мощности

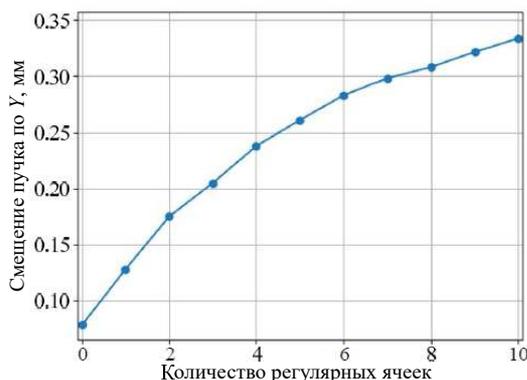


Рис. 13. Зависимость смещения пучка на тормозной мишени от количества регулярных ячеек

В случае комплекса лучевой терапии длина ускоряющей структуры мала, поэтому данный эффект играет относительно небольшую роль — смещение медианы пучка составляет 0.26 мм, а увеличение его среднеквадратичных размеров — 0.1 мм по оси Y . Поперечное распределение представлено на рис. 14. Изменение коэффициента захвата составило менее 0.2 %.

При увеличении количества регулярных ячеек с целью достижения более высокой энергии эффект смещения пучка на мишени необходимо принимать во внимание, особенно при использовании узкого щелевого коллиматора для формирования пучка тормозного излучения. Для устранения эффекта

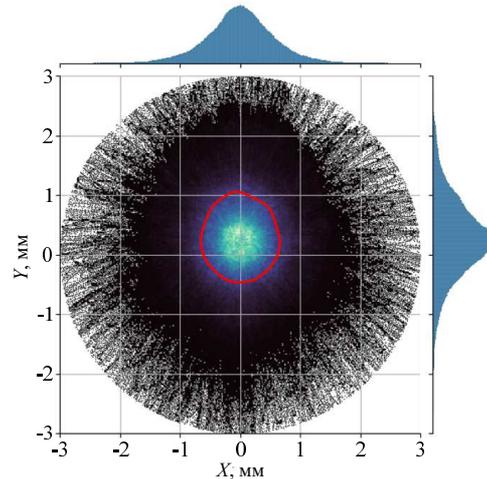


Рис. 14. Поперечное распределение пучка на мишени с учетом узла ввода мощности. В красной области находится 50 % частиц

смещения пучка дипольной компонентой магнитного поля ячейки узла ввода мощности необходимо ее симметризовать добавлением второго окна связи.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ВАРИАНТА УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Результаты представленных выше расчетов легли в основу конструкции окончательного варианта ускоряющей системы для ускорителя комплексной лучевой терапии «Оникс». Вид ускоряющей системы показан на рис. 15. Детально результаты испытаний ускорителя будут описаны в отдельной работе, наиболее важные из них приведены на рис. 16–18.

На рис. 16 показаны измеренные с помощью водного фантома процентные глубинные дозы для энергий 2.5 МэВ и 6 МэВ. Вычисленные на основании этих зависимостей значения $TPR_{20,10}$ составляют соответственно 0.629 и 0.555 для 6 МэВ и 2.5 МэВ. Проектное значение для 6 МэВ составляет $TPR_{20,10} = 0.634 \pm 0.01$ [9], т.е. измеренное значение находится в пределах допуска. Значение $TPR_{20,10}$ для 2.5 МэВ не специфицировано в силу того, что тормозное излучение при этой энергии используется для получения портального изображения пациента.

На рис. 17 приведена зависимость мощности дозы от частоты следования импульсов. Можно увидеть, что проектная мощность дозы 10 Гр/мин достигается при частоте следования импульсов 400 Гц. Зависимость от частоты следования импульсов линейная, что свидетельствует об отсутствии каких-либо тепловых эффектов, в том числе эффекта, связанного с разогревом катода обратным потоком электронов.

Отсутствие эффекта обратной бомбардировки катода подтверждается зависимостью мощности дозы от времени при максимальной частоте следования



Рис. 15. Окончательный вариант ускоряющей системы

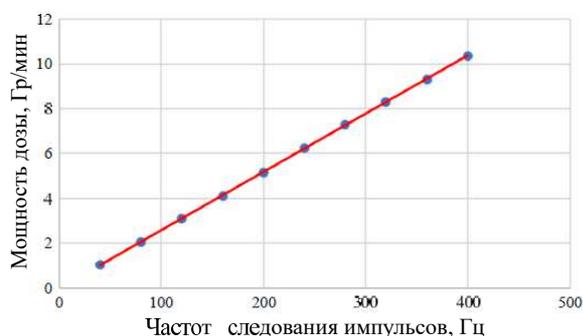


Рис. 17. Зависимость мощности дозы от частоты следования импульсов

импульсов, приведенной на рис. 18. При требуемой стабильности мощности дозы $\pm 10\%$ наблюдаемое среднеквадратичное отклонение составляет около 0.1% , причем эта величина обусловлена в основном измерительными эффектами.

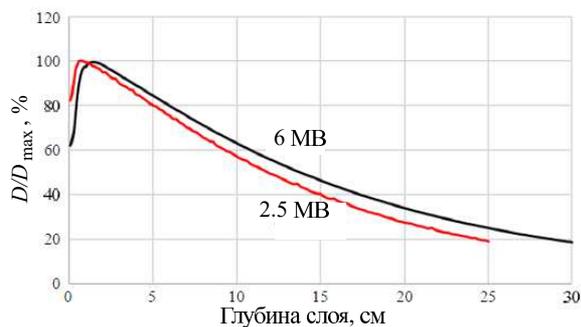


Рис. 16. Процентные глубинные дозы для энергий 2.5 МэВ и 6 Мэ

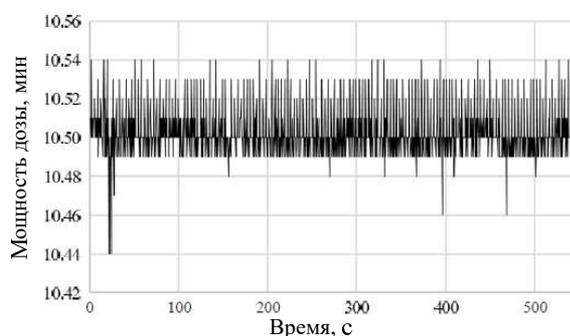


Рис. 18. Зависимость мощности дозы от времени при максимальной частоте следования импульсов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальная проверка окончательного варианта ускоряющей системы показала полное соответствие характеристик тормозного излучения требованиям технического задания.

[1] Овчинникова Л.Ю., Шведун В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 6. 34 (2018). (Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov V.I. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 6. 599 (2018)).

[2] Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov V.I. // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16–21 September 2018, 549551, (2018).

[3] Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov V.I. // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16–21 September 2018, 549551, (2018).

[4] Ermakov A.N., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Y. et al. // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018,

pp. 130132, (2018).

[5] Родько И.И., Сарычев Г.А. Балакирев, П.В. и др. // Атомная энергия **125**, № 5. 292 (2018).

[6] Овчинникова Л.Ю. Линейный ускоритель электронов С-диапазона для комплекса лучевой терапии // Дисс... к.ф.-м.н, М., 2019.

[7] Chernysh V.S., Ermakov A.N., Ieshkin A.E. et al. // *Journal of Instrumentation.* **16**, N 2 (2021).

[8] Юров Д.С. Разработка и испытания ускорителя для комплекса лучевой терапии «Оникс» / Семинар ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ и кафедры общей ядерной физики (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/depniseminar/07.10.21.pdf>)

- [9] Юров Д.С. и др. Разработка линейного ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии. I Подавление эффекта обратной бомбардировки катода // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **79**, № 5. 2451001 (2024).
- [10] Борисов М.А. Программа Daln. В печати.
- [11] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [12] Brualla L., Rodriguez M., Sempau J., Andreo P. // *Radiation Oncology* **14:6** (2019).
- [13] Wilson P.B., Griffin J.E. // AIP conference proceedings. American Institute of Physics. **87**, N 1. 450 (1982).

Development of an Electron Linac for Radiation Therapy II. Reduction of Accelerating Field Strength, Improvement of Accelerating Structure Efficiency

D.S. Yurov^{1,2,a}, M.A. Borisov^{2,3,b}, A.S. Alimov^{1,2,c}, Bagova^{4,d}, A.N. Ermakov^{1,2}, A.N. Kamanin^{1,2}, T.K. Lobzhanidze⁴, N.I. Pakhomov^{1,2}, A.S. Simonov², V.V. Khankin^{1,2}, V.I. Shvedunov^{1,2}, I.V. Shvedunov^{2,j}, N.V. Shvedunov^{1,2}

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

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

³Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

⁴National Technical Physics and Automation Research Institute. Moscow 115230 Russia

E-mail: ^ad_yurov88@mail.ru, ^bmuchmaxx@gmail.com, ^calim8591@gmail.com, ^dbagova2009@yandex.ru

The second part of the article on the development of an electron linac for the radiation therapy complex «Onyx» is devoted to solving problems associated with the high electric field strength in the accelerating structure, which include high dark currents, a lengthy conditioning process, significant consumption of pulsed RF power for ohmic losses in the structure walls, and its low efficiency. The article outlines the steps we took to reduce the electric field and increase the efficiency of the accelerating structure. The main results of the bremsstrahlung characteristics tests for the final version of the accelerating structure are presented.

PACS: 87.56.bd.

Keywords: electron linacs, radiation therapy, accelerating structure, beam dynamics, electric field strength.

Received 26 June 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2024. **79**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

- Юров Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: d_yurov88@mail.ru.
- Борисов Максим Антонович — аспирант физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; e-mail: muchmaxx@gmail.com.
- Алимов Андрей Сергеевич — кандидат физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: alim8591@gmail.com.
- Багова Сюзанна Зауровна — медицинский физик АО «НИИТФА»; e-mail: bagova2009@yandex.ru.
- Ермаков Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; e-mail: a_ermak1978@mail.ru.
- Каманин Андрей Николаевич — вед. электроник НИИЯФ МГУ; e-mail: akamanin@gmail.com.
- Лобжанидзе Тенгиз Константинович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: tklobganidze@niitfa.ru.
- Пахомов Николай Иванович — гл. инженер; e-mail: nipakhomov@mail.ru.
- Симонов Анатолий Сергеевич — вед. конструктор ООО «ЛЭУ МГУ».
- Ханкин Вадим Валерьевич — кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИЯФ МГУ; e-mail: v-k32@yandex.ru.
- Шведунув Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ, профессор; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.
- Шведунув Иван Васильевич — вед. инженер-программист ООО «ЛЭУ МГУ», e-mail: ivan4th@gmail.com.
- Шведунув Николай Васильевич — вед. программист НИИЯФ МГУ; e-mail: gg.swedn@gmail.com.