

Разработка линейного ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии I. Подавление эффекта обратной бомбардировки катода

Д.С. Юров,^{1,2,*} М.А. Борисов,^{2,3,†} А.С. Алимов,^{1,2,‡} А.Н. Ермаков,^{1,2}
А.Н. Каманин,^{1,2} Н.И. Пахомов,^{1,2} А.С. Симонов,² Я.Ю. Филиппов,^{4,§}
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

⁴Научно-исследовательский институт механики Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова. Россия, 119192, Москва, Мичуринский пр-т, д. 1
(Поступила в редакцию 26.06.2024; подписана в печать 26.07.2024)

Статья посвящена разработке линейного ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии «Оникс». Дан краткий обзор ускорителя, указаны основные проблемы, возникшие в процессе разработки. Основная часть статьи содержит решение наиболее критичной из них, связанной с обратной бомбардировкой катода электронной пушки, и приводившей к нестабильности тока пушки и мощности дозы тормозного излучения во времени. Описаны изменения в конструкциях ускоряющей структуры и электронной пушки, позволившие устранить проблему обратной бомбардировки и достичь требуемой стабильности параметров тормозного излучения.

PACS: 87.56.bd. УДК: 53.06.

Ключевые слова: линейные ускорители электронов, лучевая терапия, ускоряющая структура, электронная пушка, обратная бомбардировка.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2451001](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2451001)

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]. Спецификация параметров тормозного излучения комплекса приведена в табл. 1, внешний вид излучателя ускорителя на испытательном стенде показан на рис. 1, а, гантри комплекса с установленным внутри излучателем показано на рис. 1, б.

Тормозное излучение генерируется электронным пучком, сформированным и ускоренным в ускоряющей системе и падающим на установленную на ее выходе мишень. Ускоряющая система, внешний вид и разрез которой показаны на рис. 2, а, б, включает в себя электронную пушку, ускоряющую структуру С-диапазона (рабочая частота 5712 МГц), тормозную мишень и ряд вспомогательных узлов, обеспечивающих подачу СВЧ-мощности в структуру, поддержание и контроль вакуума, контроль величины ускоряющего поля.

Линейный ускоритель способен работать в двух режимах по энергии ускоренного пучка электронов — режиме сообщения терапевтической дозы при энергии 6 МэВ и в режиме получения портального изображения при энергии 2.5 МэВ. Снижение энергии при получении портального изображения позволяет повысить контрастность изображения и снизить дозовую нагрузку на пациента.

Использование клистрона в качестве источника СВЧ энергии в данном проекте дает возможность реализовать все современные методики лучевой терапии, реализуемые в настоящее время только на дорогостоящих ускорителях на высокую энергию пучка.

В процессе испытаний опытного образца ускорителя был выявлен ряд существенных проблем, основными среди которых были:

- нестабильность тока инжектируемого и ускоренного пучка вследствие эффекта обратной бомбардировки катода;
- пробой в ускоряющей структуре из-за высокой напряженности ускоряющего поля;
- недостаточная для достижения проектных параметров излучения, указанных в табл. 1, СВЧ-мощность клистрона;
- смещение пучка на тормозной мишени.

* E-mail: d_yurov88@mail.ru

† E-mail: muchmaxx@gmail.com

‡ E-mail: alim8591@gmail.com

§ E-mail: filippovy@my.msu.ru



Рис. 1. *а* — Стенд для испытаний ускорителя электронов для лучевой терапии. *б* — Ускоритель электронов, установленный в гантри

Таблица 1. Спецификация параметров тормозного излучения комплекса

Параметр	Величина
Высокая энергия	6 МэВ
Глубина максимальной поглощённой дозы на оси пучка излучения в водном фантоме, d_{max} , без выравнивающего фильтра	1.5 ± 0.2 см
Процентная глубинная доза на глубине 10 см в водном фантоме, PDD10, без выравнивающего фильтра	$63.8 \pm 0.9\%$
Отношение ткань–фантом, TPR20,10, без выравнивающего фильтра	0.634 ± 0.01
Низкая энергия, не более	2.5 МэВ
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме высокой энергии	1–10 Гр/мин на 1 м на глубине максимальной поглощённой дозы
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме низкой энергии	0.01 — 0.5 Гр/мин на 1 м
Макс. частота повторения в режиме высокой энергии	400 Гц
Макс. частота повторения в режиме низкой энергии	400 Гц
Стабильность высокой энергии	$\pm 3\%$
Стабильность низкой энергии	$\pm 3\%$
Стабильность мощности дозы при высокой энергии	$\pm 10\%$
Стабильность мощности дозы при низкой энергии	$\pm 10\%$
Время непрерывной работы при максимальной мощности дозы и энергии, минимальное	30 мин

Решение перечисленных проблем проводилось в два этапа с промежуточной проверкой результатов расчетов с помощью специально изготовленного экспериментального образца ускоряющей системы. На первом этапе был рассчитан вариант ускоряющей системы с подавленным эффектом обратной бомбардировки катода, на втором этапе были приняты меры по снижению напряженности электрического поля на поверхности и повышению эффективности ускоряющей структуры.

Данная статья посвящена описанию методики и результатов оптимизации ускоряющей системы с целью подавления эффекта обратной бомбарди-

ровки катода. Решение остальных проблем описано в отдельной статье.

1. МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ОБРАТНОЙ БОМБАРДИРОВКИ КАТОДА

Эффект обратной бомбардировки катода электронами, не захваченными в режим ускорения, может представлять серьезную проблему для высокочастотных линейных ускорителей, работающих в режиме стоячей волны, см., например, [9] и ссылки в указанной работе. Эффект обусловлен тем,



Рис. 2. *a* — Опытный образец ускоряющей системы: 1 — электронная пушка, 2 — ускоряющая структура, 3 — вакуумное СВЧ окно, 4 — антенна, 5 — электроразрядный насос; *b* — ускоряющая структура в разрезе

что на вход ускоряющей структуры, в резонаторах которой осциллирует высокочастотное электромагнитное поле, поступает непрерывный электронный поток от пушки, при этом часть электронов потока может оказаться в области фаз электромагнитного поля, для которых выполняются условия ускорения частиц в обратном направлении — направлении катода.

Другим источником обратных электронов могут быть темновые токи — электроны, вылетающие с поверхности ячеек ускоряющей структуры в результате автоэмиссии в местах с высокой напряженностью электрического поля. Темновые электроны в зависимости от фазы образования относительно ускоряющего поля могут лететь как по направлению к мишени, так и по направлению к катоду, в процессе набирая достаточно высокую энергию. Особенно это актуально для структур с высоким ускоряющим градиентом, как в случае обсуждаемого ускорителя для комплекса лучевой терапии. Детальное рассмотрение проблемы темновых токов для опытного образца ускоряющей структуры с примерами измеренных спектров приведено в [7].

Степень воздействия обратного электронного потока на катод зависит от средней энергии возвращающихся электронов, их среднего тока, пространственного распределения частиц в поперечной плоскости, а также от свойств катода — его размера, конструкции, материала, из которого он изготовлен, мощности подогревателя. В отдельных случаях, в особенности у ускорителей на низкую, менее 1 кВт, среднюю мощность ускоренного пучка, эффект выражен слабо и проявляется в некотором снижении срока службы катода. В других случаях, даже при умеренной средней мощности, от 1 кВт и более, он может полностью препятствовать нормальной работе ускорителя.

Проявление эффекта обратной бомбардировки катода в процессе испытания опытного образца ускоряющей системы медицинского ускорителя иллюстрирует рис. 3, на котором для различных частот повторения импульсов тока пучка показаны зависимости от времени амплитуды импульса тока пушки и мощности дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени.

В ходе экспериментов на управляющем электроде трехэлектродной электронной пушки в соответствии с расчетами было установлено напряжение, обеспечивающее ток пучка 180–190 мА. Как следует из рис. 3, *a*, при включении излучения с течением времени наблюдался рост тока пушки, тем больший и тем более быстрый, чем выше частота следования импульсов, соответственно больше средняя мощность пучка. По истечении некоторого времени, тем меньшего, чем больше частота следования импульсов, начинался спад тока, однако его значение оставалось существенно большим расчетного значения. Что касается мощности дозы тормозного излучения, при частоте следования импульсов выше 125 Гц наблюдался ее рост со временем — рис. 3, *b*. При частоте следования импульсов выше 200 Гц рост тока пушки и мощности дозы наблюдался даже при выключении тока подогревателя катода пушки.

Показанное на рис. 3 поведение тока пушки и мощности дозы было интерпретировано как следствие эффекта обратной бомбардировки катода. В описанных экспериментах ток подогревателя катода устанавливался на уровне, обеспечивающем работу пушки в режиме насыщения пространственного заряда. Это означает, что увеличение температуры катода, в том числе из-за его дополнительного разогрева потоком обратных электронов, не должно приводить к росту тока пушки, который в этих условиях определяется напряжением на управляющем электроде. Было сделано предположение, что наблюдаемый рост тока пушки обусловлен увеличением площади поверхности, с которой происходит эмиссия электронов.

Увеличение площади эмиссионной поверхности вызвано тем, что вследствие дополнительного разогрева поверхности катода обратным потоком электронов происходит интенсивное испарение активного вещества и его напыление на окружающий катод фокусирующий электрод. Фокусирующий электрод также разогревается обратным потоком и становится дополнительным источником электронов, что первоначально ведет к росту тока пушки. Последующий спад тока предположительно объясняется конкуренцией процессов осаждения испаренного с катода активного вещества и его испарением с фокусирующего электрода.

Значительно более медленный, чем рост тока пушки, рост мощности дозы обусловлен тем, что основная часть электронов, эмитируемых с фокусирующего электрода, находится вне поперечного акцептанса ускоряющей структуры и оседает на стенках пролетного канала, создавая лишь дополнительную паразитную нагрузку ускоряющей структуры током пучка и не генерируя тормозное излучение на мишени.

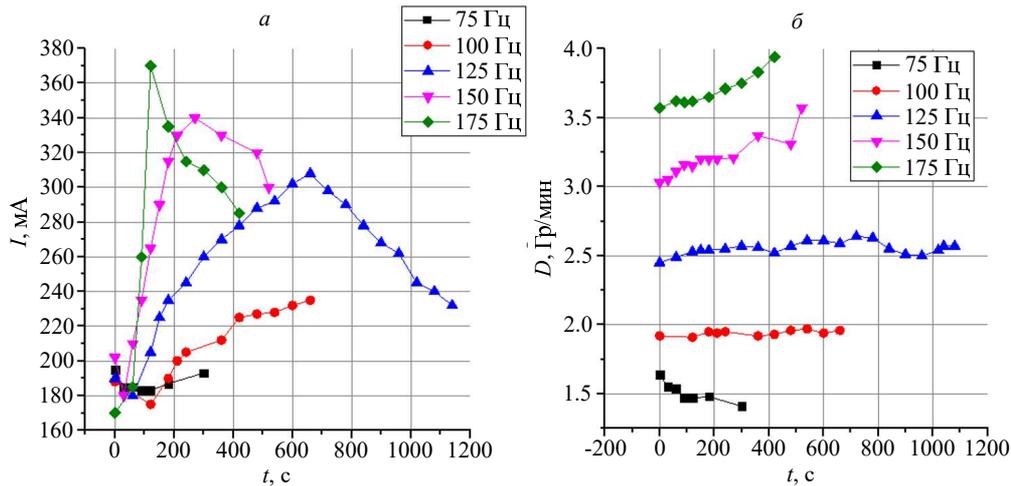


Рис. 3. Зависимость от времени при различных частотах следования импульсов (а) амплитуды импульса тока пушки; (б) мощности дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени

Вывод об образовании дополнительной эмитирующей поверхности подтверждается результатами анализа элементного состава вещества на поверхности фокусирующего электрода вблизи катода, сделанного при вскрытии пушки, который указал на наличие значительного количества бария. Анализ проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа Supra 50 VPLEO с системой микроанализа на основе беззотного энергодисперсионного спектрометра Inca Energy 350X-Max 80. Фото поверхностей фокусирующего и управляющего электродов с процентным содержанием элементов показано на рис. 4.

Известны несколько методов подавления эффекта обратной бомбардировки катода.

1. Оптимизация геометрии ускоряющей структуры с целью увеличения коэффициента захвата частиц в режим ускорения и снижения мощности потока обратных электронов.
2. Введение диафрагм, снижающих поток обратных электронов на катод, в сочетании с отверстием в центре катода для пропускания части обратного потока [10–12].
3. Внеосевая инжекция пучка через магнитную систему от расположенной под углом к оси ускоряющей структуры электронной пушки [13] либо использование пушки со смещенным относительно оси катодом и выводом пучка на ось электростатическим полем [14, 15].
4. В случае высокого вклада темновых токов в обратный поток электронов — уменьшение величины электрического поля на поверхности ячеек ускоряющей структуры.

В настоящей работе для снижения эффекта обратной бомбардировки используются два первых метода, поскольку внеосевая инжекция пучка требует существенного изменения конструкции и габаритов ускоряющей системы.

2. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Первоначальная оптимизация ускоряющей структуры проводилась с помощью специальной программы расчета динамики пучка Daln [16]. В процессе оптимизации ускоряющей структуры программа могла осуществлять вариацию длины ускоряющих ячеек и уровня ускоряющего поля в них либо масштабируя в соответствии с длиной ячейки поля, рассчитанные с помощью программы CSTStudioSuite [17], либо используя распределение поля цилиндрического резонатора. В качестве критерия оптимизации выступали коэффициент захвата частиц в режим ускорения, процент частиц, движущихся в сторону катода, процент частиц, попадающих на катод, ширина энергетического спектра ускоренного пучка для высокой и низкой энергий. При этом были наложены ограничения на минимальную и максимальную длину ячейки, а также на суммарную длину начальной части ускоряющей структуры. Также предпочтение отдавалось распределениям ускоряющего поля, не содержащим ячеек с амплитудой ускоряющего поля на оси, существенно превышающей амплитуду поля регулярных ячеек, поскольку именно такие ячейки из-за большой напряженности поля на поверхности будут являться источниками темнового тока, и в них с большой вероятностью будут происходить СВЧ-пробои.

Для окончательной оптимизации ускоряющей структуры в программу Daln загружалось поле из программы CSTStudioSuite для каждой ячейки в отдельности, после чего производилось варьирование в небольших пределах их длины и амплитуды так же, как на этапе поиска первичного распределения. Найденные новые параметры использовались для изменения геометрии структуры в CST Studio Suite, после чего производилась ее настройка по частоте. Процесс оптимизации произво-

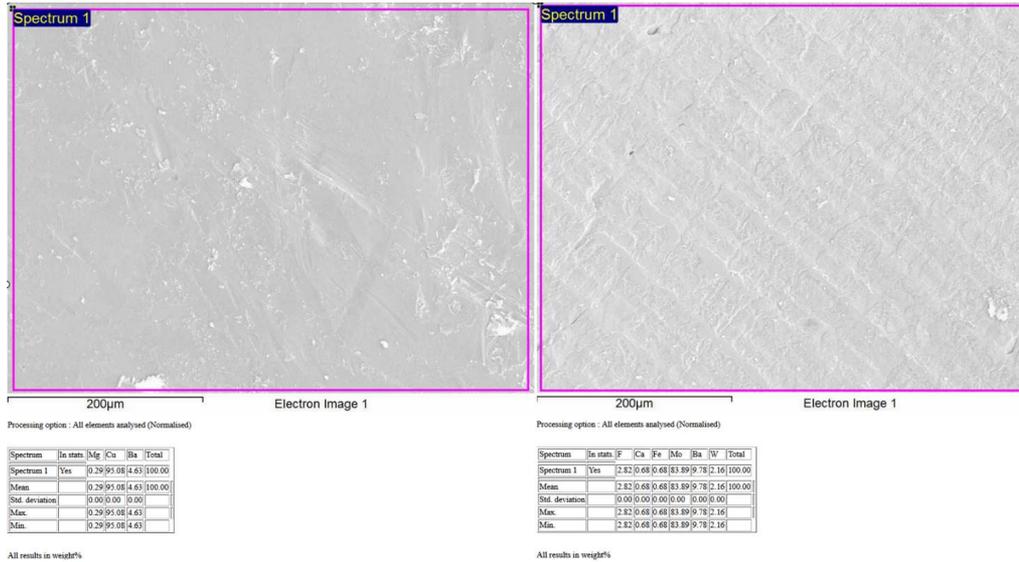


Рис. 4. Результаты элементного анализа управляющего (слева) и фокусирующего (справа) электродов электронной пушки

дится итерационно (в среднем 2–3 итерации), до достижения оптимального результата. На последнем этапе рассчитывалось окно связи ускоряющей структуры с питающим волноводом.

Расчет электронной пушки и оптимизация геометрии ее электродов проводились с помощью программы CST Studio Suite в модуле TRK. В качестве модели эмиссии использовалась термоэлектронная эмиссия. Работа выхода полагалась равной 1.8 эВ, начальное распределение электронов по энергии соответствовало распределению Максвелла с начальным углом вылета, находящимся в пределах конуса с раствором в 45° .

После расчета полей электронной пушки и ускоряющей структуры с помощью программы CST Studio Suite проводился расчет динамики пучка с использованием модуля PIC с учетом пространственного заряда. Для анализа результатов расчета использовался PIC 2Dmonitor, позволяющий отслеживать прошедшие через него частицы и записывать их координаты в 6-мерном фазовом объеме. Такие мониторы были установлены перед тормозной мишенью и перед катодом. Также отслеживалось попадание частиц на «твердые» поверхности модели: регистрировались координаты на поверхности и заряд и энергия таких частиц. Данная информация может быть использована для тепловых расчетов и расчетов радиационной защиты.

3. ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ОБРАТНОЙ БОМБАРДИРОВКИ КАТОДА

3.1. Расчет ускоряющей структуры

Как было установлено в результате ранее выполненных расчетов и экспериментов с опытным образцом ускоряющей системы, основными источни-

ками потока обратных электронов являются вторая и третья ускоряющие ячейки. В этой связи с целью сокращения сроков изготовления экспериментального образца в расчетах варианта структуры с подавленным эффектом обратной бомбардировки геометрия четырех регулярных и концевой ускоряющих ячеек была оставлена той же, что и в опытном образце. Также была принята во внимание необходимость сохранения длины ускоряющей системы и положения питающего волновода для установки в существующую радиационную защиту.

Оптимизация ускоряющей структуры проводилась с помощью методики, описанной в разд. 3. Сравнение старой и новой геометрий ускоряющей структуры представлено на рис. 5, распределений ускоряющего поля на оси — на рис. 6, сравнение параметров структур приведено в табл. 2. Как видно на рис. 5, б, в новой геометрии на входе в первую ячейку установлена диафрагма с отверстием малого диаметра для снижения числа электронов обратного потока, попадающих в пушку.

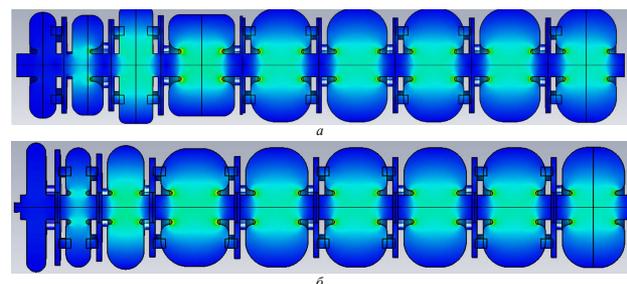


Рис. 5. Сравнение геометрий ускоряющих структур старой (а); новой (б), рассчитанной в настоящей работе

Таблица 2. Параметры старой и новой, рассчитанной в настоящей работе, ускоряющих структур

Параметры	Старая	Новая
Общая длина, мм	208.92	205.19
Рассеиваемая мощность, МВт	2.34	2.21
Максимальная амплитуда поля на оси, МВ/м	70.6	71.2
Максимальная амплитуда поля на поверхности, МВ/м	182.7	189.9

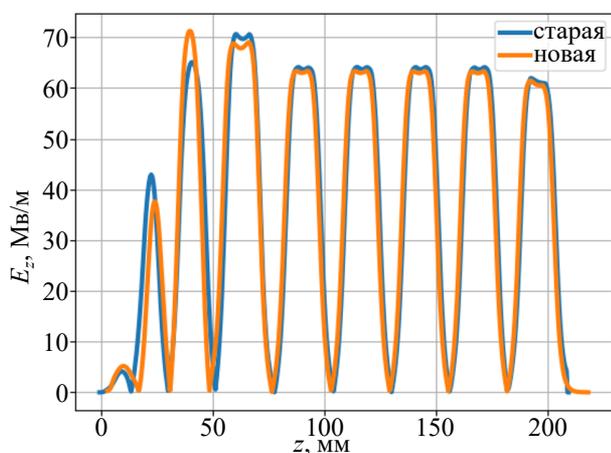


Рис. 6. Сравнение распределений ускоряющего поля на оси старой (синяя линия) и новой, рассчитанной в настоящей работе, ускоряющих структур

3.2. Расчет электронной пушки

Геометрия трехэлектродной электронной пушки, используемой в проекте медицинского ускорителя, схематически показана на рис. 7.

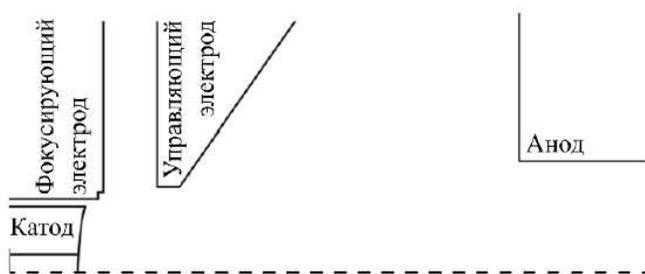


Рис. 7. Геометрия электронной пушки

Пушка состоит из катода, фокусирующего и управляющего электродов и анода, в качестве которого используется торцевая стенка ускоряющей структуры. Поверхность катода имеет сферическую форму, обеспечивающую равномерное распределение электрического поля по поверхности эмиссии и, как следствие, более равномерную плотность тока. В центре катода может быть выполнено отверстие, обеспечивающее прохождение через него части обратного потока электронов, летящих из ускоряющей структуры. Диаметр отверстия определяется результатами расчета динамики пучка

ка в ускоряющей структуре, исходя из распределения частиц, попадающих на катод.

Катод размещен в фокусирующем электроде, обеспечивающем фокусировку низкоэнергетического потока электронов, вытягиваемых электрическим полем из прикатодного электронного облака. Изменяя его форму и степень погружения в него катода, можно влиять на положение кроссовера пучка пушки. Регулирование тока пушки осуществляется изменением напряжения на управляющем электроде, типичный диапазон изменения напряжения относительно катода — сотни вольт–единицы киловольт.

В качестве начального приближения для оптимизации геометрии электродов электронной пушки была взята геометрия электродов опытного образца ускоряющей системы. Была установлена диафрагма на входе в анодное отверстие и введено отверстие в центре катода. Разность потенциалов между катодом и анодом составляет 25 кВ.

Траектории частиц в оптимизированной геометрии пушки представлены на рис. 8 для расчетного тока 190 мА. На рисунке видна диафрагма, установленная на входе в ускоряющую структуру, параметры отверстия в которой были подобраны исходя из условия: диаметр пучка при рабочем значении тока + 1 мм. Установка диафрагмы позволяет существенно уменьшить поток частиц, выходящих из структуры в сторону катода.

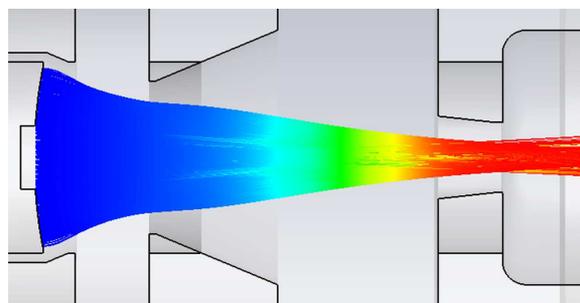


Рис. 8. Траектории частиц в пушке для расчетного тока 0.19 А

Также форма фокусирующего электрода в прикатодной области подобрана таким образом, чтобы минимизировать попадание активного вещества катода на поверхность электрода, способную эмитировать электроны при разогреве обратным потоком. Кроме того, диаметр отверстия в управляющем электроде сделан меньшим диаметра катода

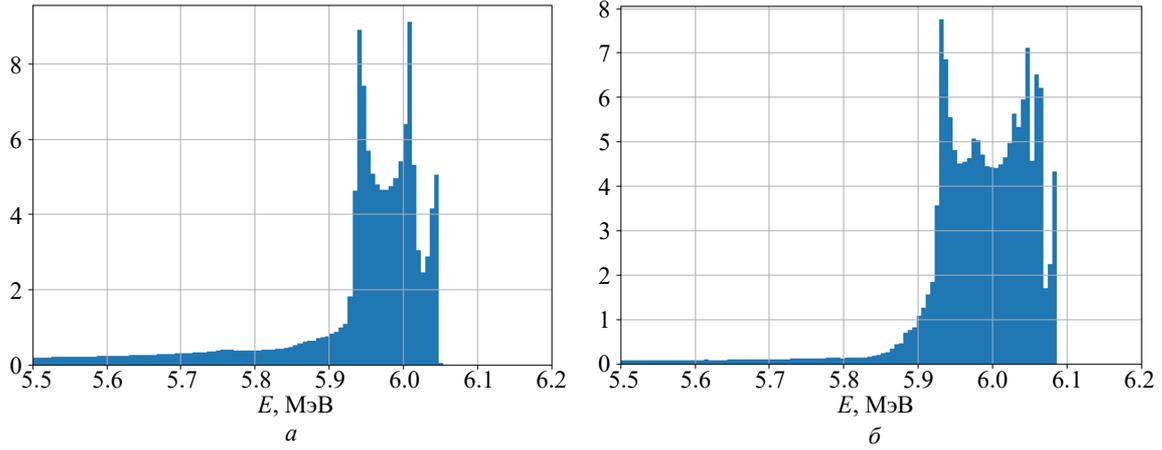


Рис. 9. Энергетические спектры ускоренного пучка на тормозной мишени для старого (а) и нового (б) вариантов ускоряющей системы

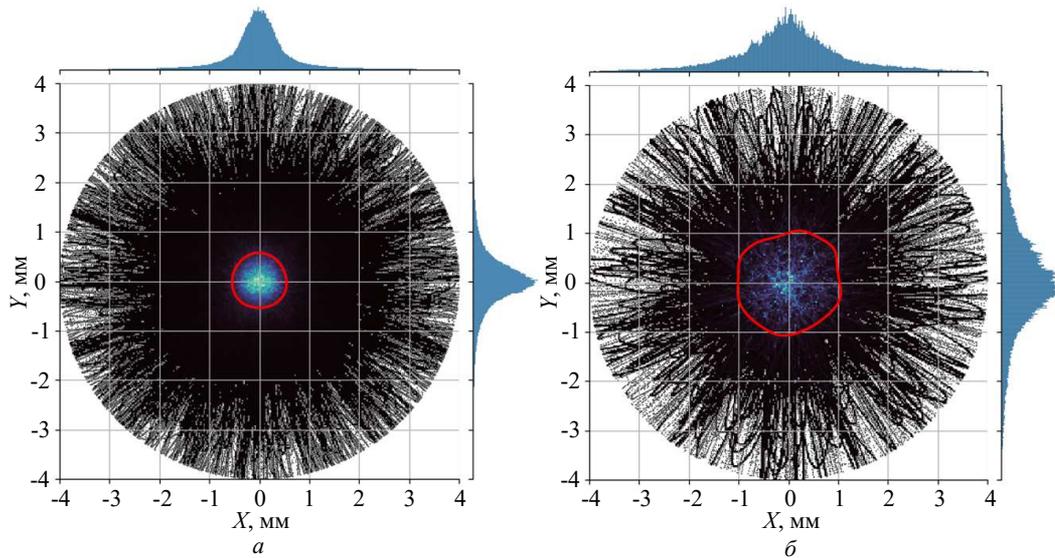


Рис. 10. Поперечное распределение частиц на тормозной мишени для старого (а) и нового (б) вариантов ускоряющей системы. В красной области находится 50% частиц

да, что обеспечивает экранировку фокусирующего электрода от электронов обратного потока.

3.3. Расчет динамики пучка в ускоряющей системе

Результаты оптимизации электронной пушки и ускоряющей структуры были использованы для расчета динамики пучка в ускоряющей системе. Расчет проводился для нескольких периодов ускоряющего поля. Были приняты во внимание возможные побочные эффекты, возникающие при объединении электростатического поля электронной пушки и электромагнитного поля ускоряющей структуры [17].

Важной задачей было достижение мощности дозы тормозного излучения 10 Гр/мин на расстоянии 1 м от мишени. Значение мощности дозы в на-

правлении вперед рассчитывалось по эмпирической формуле [18], модифицированной для учета формы энергетического спектра:

$$D \approx \frac{0.33I}{Q} * \left(\frac{\sum_i^N E_i}{N} \right)^3 (//), \quad (1)$$

где E_i — энергия i -й частицы, I — импульсный ток, Q — скважность, N — количество частиц в ансамбле.

Результаты расчета динамики пучка для старой и новой ускоряющих систем сравниваются в табл. 3. Сравнение спектров и поперечного распределения частиц на мишени приведены на рис. 9 и 10 соответственно. Из таблицы видно, что геометрия новой ускоряющей структуры позволила увеличить коэффициент захвата с 66% до 77% за счет лучшей группировки частиц в начальной части. Это, в свою очередь, привело к уменьшению тока пушки, необходимого для получения проектной выход-

Таблица 3. Сравнение результатов расчета динамики пучка для старой и новой ускоряющих систем

Параметры	Старая	Новая
Коэффициент захвата, %	66.1	77.5
Обратный поток, %	13.9	2.1
Частиц с энергией < 5.7 МэВ, %	22.14	10.91
Разброс по энергии, МэВ	1.1	0.79
Рабочий ток пушки, мА	253	200
% оседающих на катоде	6.54	0.9
% попадающих в отверстие катода	0.995	1.2
% оседающих на апертуре		7.4

ной мощности дозы в 10 Гр/мин. Также уменьшился обратный поток частиц, с 13.9% до 11.6%. Установка апертуры на входе в ускоряющую структуру и увеличение диаметра отверстия в центре катода также позволили уменьшить количество частиц, попадающих на катод, до 2.1%, что в 6.6 раз меньше, чем в старом варианте. С учетом уменьшения тока пушки ток, падающий на катод, уменьшился в 8.6 раз. При сравнении энергетических спектров видно, что в области 6 МэВ распределение стало шире. Однако значительно был уменьшен процент частиц в области низкоэнергетического «хвоста». Благодаря этому спектр тормозного излучения становится «жестче», что увеличивает его проникающую способность и уменьшает импульсный ток на тормозной мишени, необходимый для достижения проектной мощности дозы.

Размер пятна пучка на тормозной мишени в новом варианте был специально увеличен (рис. 10) для снижения тепловой нагрузки, поскольку на опытном образце ускоряющей системы имело место плавление мишени в месте падения пучка.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

По результатам выполненных расчетов ускоряющей структуры и электронной пушки был изготовлен экспериментальный образец ускоряющей системы и проведены его испытания в составе ускорителя электронов для лучевой терапии.

На рис. 11 показано сравнение расчетного распределения ускоряющего поля на оси с результатами измерений на спаянной ускоряющей структуре. Видно неплохое соответствие, свидетельствующее о достоверности результатов расчета. На рис. 12, а сравниваются расчетная и измеренная зависимости тока пушки от напряжения на управляющем электроде. Расчет несколько завышает величину тока, однако достижимая величина тока позволяет обеспечить требуемую мощность дозы.

На рис. 12, б показана измеренная зависимость мощности дозы на расстоянии 1 м от тормозной мишени от частоты следования импульсов для мощно-

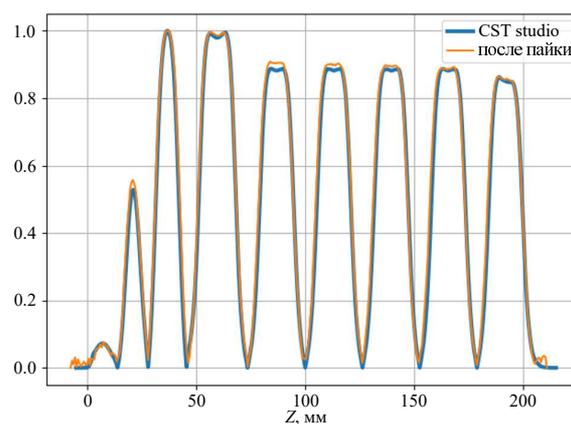


Рис. 11. Сравнение расчетного распределения ускоряющего поля на оси с результатами измерений на спаянной ускоряющей структуре

сти клистрона 3 МВт. Видна линейная зависимость, указывающая на отсутствие эффектов, связанных со средней мощностью пучка, в том числе эффектов обратной бомбардировки катода. При увеличении мощности клистрона до 3.3 МВт была достигнута проектная мощность дозы около 10 Гр/мин.

Отсутствие заметного эффекта обратной бомбардировки катода подтверждает рис. 13, на котором приведены отклонения измеряемой мощности дозы от среднего значения на участке времени длительностью 50 мин из общего 2-часового прогона при мощности дозы около 5 Гр/мин. Измерения проводились ионизационной камерой с частотой выборки 2 измерения в секунду.

Таким образом, испытания ускоряющей системы подтвердили правильность выбранного подхода к ее оптимизации и достоверность результатов расчета. В то же время следует отметить наличие СВЧ-микроразрядов в ускоряющей структуре, приводящих к небольшим выбросам в графике мощности дозы (рис. 13), что указывает на необходимость снижения напряженности электрического поля.

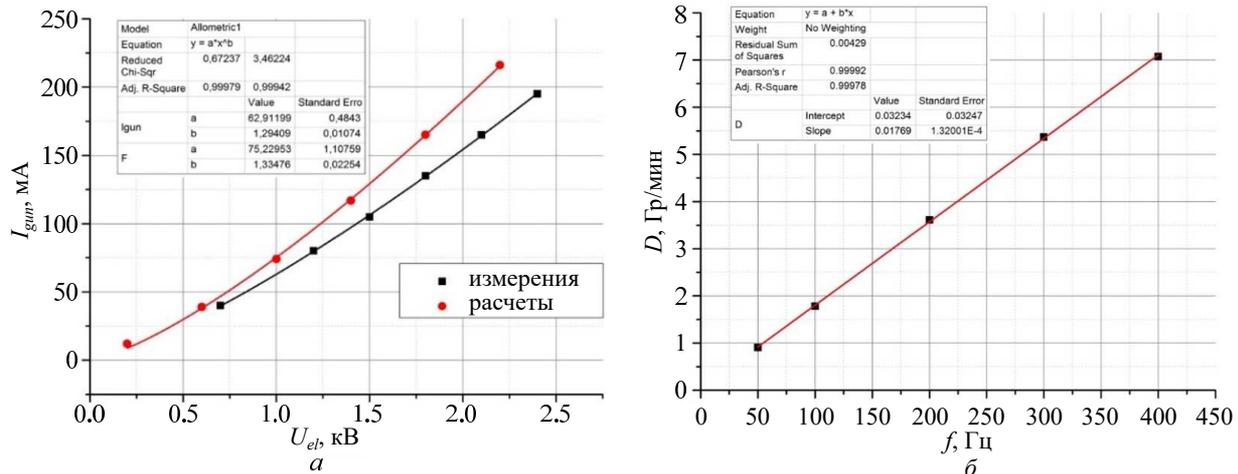


Рис. 12. *а* — Сравнение расчетной и измеренной зависимостей тока пушки от напряжения на управляющем электроде. *б* — Измеренная зависимость мощности дозы на расстоянии 1 м от тормозной мишени от частоты следования импульсов

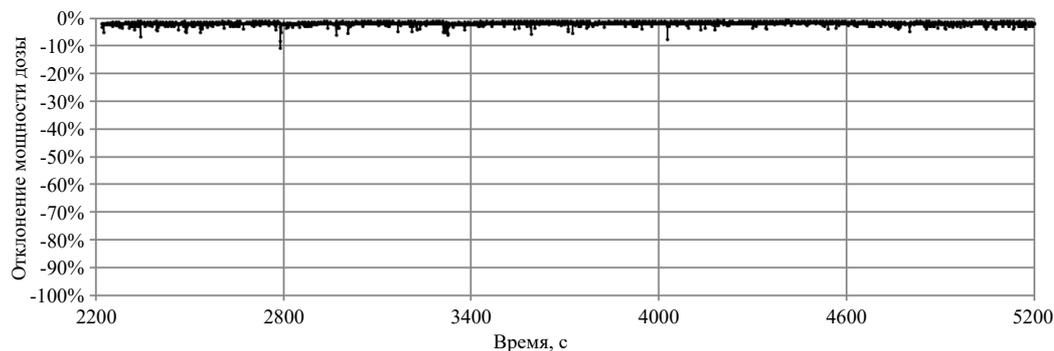


Рис. 13. Отклонения измеряемой мощности дозы от среднего значения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной оптимизации создан образец ускоряющей системы, для которого была решена проблема обратной бомбардировки катода и обеспечена долговременная стабильность мощности дозы.

Авторы выражают благодарность за неоценимую помощь в разработке ускорителя заведующему отделом электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ, доктору физ.-мат. наук профессору **Б. С. Ишханову** и научному руководителю проекта «Оникс» академику РАН В. П. Смирнову.

- [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] *Yurov D.S., Alimov A.S., Ermakov A.N. et al. В // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. pp. 133-135, (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. Москва, 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://nuc1phys.sinp.msu.ru/depniseminar/07.10.21.pdf>)*
- [9] *Ханкин В.В., Шведун В.И. // Вестн. Моск. ун-*

- та. *Физ. Астрон.* № 1. 37 (2020). (*Khankin V.V., Shvedunov V.I.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **75**, N 1. 37 (2020)).
- [10] *Eiji Tanabe.* Linear Accelerator with Improved Input Cavity Structure and Including Tapered Drift Tubes. US Patent: 5,381,072 Jan. 10, 1995.
- [11] *Андреев Н.В., Белугин В.М., Пироженко В.М., Розанов Н.Е.* Линейный ускоритель электронов / Патент RU 2 392 782 C1 29.09.2008.
- [12] *Curtis G. Allen, Christopher P. Ferrari, Adam J. Mitchel.* Systems and Methods Utilizing a Triode Hollow Cathode Electron Gun for Linear Particle Accelerators. Patent No.: US 9.257.253 B1 Feb. 9, 2016.
- [13] *Miller R.B., Loda G., Miller R.C.* et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* **211.** 562 (2003).
- [14] *Aloev A.V., Carrillo D., Kubyshin Y.A., Shvedunov V.I.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* **624.** 39 (2010).
- [15] *Овчинникова Л.Ю., Шведун В.И.* // Приборы и техника эксперимента. № 3, 89 (2015).
- [16] *Борисов М.А.* Программа Daln, в печати
- [17] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [18] *Swanson W.P.* Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators. 1979.

Development of an Electron Linac for Radiation Therapy I. Suppression of Cathode Back-bombardment Effect

D.S. Yurov^{1,2,a}, M.A. Borisov^{2,3,b}, A.S. Alimov^{1,2,c}, A.N. Ermakov^{1,2}, A.N. Kamanin^{1,2}, N.I. Pakhomov^{1,2}, A.S. Simonov², Ya.Yu. Filippov^{4,g}, V.V. Khankin^{1,2}, V.I. Shvedunov^{1,2}, I.V. Shvedunov^{2,j}, N.V. Shvedunov^{1,2}

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

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

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

⁴*Institute of Mechanics Research, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^ad_yurov88@mail.ru, ^bmuchmaxx@gmail.com, ^calim8591@gmail.com, ^dfilippovyy@my.msu.ru

The article is devoted to the development of an electron linac for the radiation therapy complex «Onyx». A brief overview of the accelerator is provided, and the main problems encountered during its development are highlighted. The core of the article addresses the solution to the most critical of them, related to the back bombardment of the electron gun cathode, which led to instability in the gun current and the bremsstrahlung dose rate over time. The modifications made to the design of the accelerating structure and electron gun, which helped eliminate the back-bombardment problem and achieve the required stability of the bremsstrahlung parameters, are described.

PACS: 87.56.bd.

Keywords: electron linacs, radiation therapy, accelerating structure, electron gun, back-bombardment.

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, ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: alim8591@gmail.com.
- 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.
- Пахомов Николай Иванович — гл. инженер; e-mail: nipakhomov@mail.ru.
- Симонов Анатолий Сергеевич — вед. конструктор ООО «ЛЭУ МГУ».
- Филиппов Ярослав Юрьевич — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник НИИ механики МГУ; e-mail: filippovyy@my.msu.ru.
- Ханкин В.В. — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; e-mail: v-k32@yandex.ru.
- Шведун В.В. — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ, профессор; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.
- Шведун В.В. — вед. инженер-программист ООО «ЛЭУ МГУ», e-mail: ivan4th@gmail.com.
- Шведун В.В. — вед. программист НИИЯФ МГУ; e-mail: gg.swedn@gmail.com.