

Исследование характеристик тормозного излучения медицинского ускорителя для комплекса лучевой терапии КЛТ-6

Л. Ю. Овчинникова^{1,2,*}, В. И. Шведунов^{1,2,†}, Т. В. Бондаренко^{3,‡}

И. Л. Дергачева³, А. Н. Ермаков^{1,2}, В. В. Ханкин^{1,2}, Д. С. Юров^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²ООО "Лаборатория электронных ускорителей МГУ Россия,
119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 77

³АО "Научно-исследовательский институт технической физики
и автоматизации Россия, 115230, Москва, Варшавское шоссе, д. 46

(Статья поступила 02.07.2019; Подписана в печать 15.08.2019)

Проведены эксперименты по измерению основных характеристик тормозного излучения — мощности дозы и верхней границы энергетического спектра.

PACS: 29.20.-c

УДК: 621.384.6, 539.01.03

Ключевые слова: тормозное излучение, электронный ускоритель, комплекс лучевой терапии.

В ускоряющей системе медицинского ускорителя установлена тормозная мишень, что исключает возможность работы с выведенным пучком электронов.

Для получения данных об ускоренном пучке электронов используются косвенные методы, основанные на измерении характеристик тормозного излучения. Целью экспериментов, описанных в данной работе, было измерение основных характеристик тормозного излучения — мощности дозы и верхней границы спектра.

Структурная схема стенда показана на рис. 1, фото стенда — на рис. 2.

Измерение мощности дозы тормозного излучения осуществлялось с помощью дозиметра ДКС-101 [1] с ионизационной камерой объёмом 0.6 см³. Оценка верхней границы спектра тормозного излучения, совпадающей с кинетической энергией ускоренных электронов, проводилась известным методом поглощающего барьера, позволяющим оценить граничную энергию спектра, измеряя степень ослабления мощности дозы при прохождении излучения через поглощающий барьер.

Измерения проводятся в геометрии узкого пучка [2], показанной на рис. 3,а. Перед формирующим коллиматором, являющимся частью радиационной защиты ускоряющей системы, устанавливается устройство перемещения поглощающего барьера. В одном из положений отверстие коллиматора полностью открыто, в другом полностью перекрыто барьером. Измерение мощности дозы производится ионизационной камерой. Для реализации геометрии узкого пучка ионизационная камера помещается в радиационную свинцовую защиту с узким каналом для прохождения прямого излучения от тормозной мишени. Параметры, использовавшиеся

в измерениях, в соответствии с обозначениями рис. 5, 6: $L = 1$ м, $d = 20$ мм, $h = 150$ мм.

В геометрии узкого пучка проникаемость барьера толщиной t при прохождении через него тормозного излучения, генерируемого электронами с полной энергией E_0 , есть отношение мощности дозы, измеренной ионизационной камерой с установленным барьером и без него:

$$E = \frac{1}{1 + \beta} \{ \sqrt{4\beta Z_e(E)} - I_{\text{gun}} K_{\text{capt}}(E) Z_e(E) \}, \quad (1)$$

$$T(E_0, t) = \frac{\int_0^{E_0} k \mu_{2>74}(k) S(E_0, k) e^{-\mu(k)t} dk}{\int_0^{E_0} k \mu_{2>74}(k) S(E_0, k) dk}, \quad (2)$$

где k — энергия квантов тормозного излучения, $S(E_0, k)$ — спектр тормозного излучения Шиффа [3] под углом близким к 0° с учётом поглощения в тормозной мишени, в слое воздуха толщиной L и в иных препятствиях, расположенных на пути пучка, за исключением поглощающего барьера, $\mu(k)$ и $\mu_{\text{возд.}}(k)$ — линейные коэффициенты поглощения материала барьера и воздуха ионизационной камеры, соответственно [4].

В процедуре определения энергии в качестве левой части уравнения (1) используется экспериментально измеренная величина проникаемости $T_{\text{экс.}}$. Правая часть, $T_{\text{расч.}}(E_e)$, рассчитана для поглощающего барьера с известными t и Z для различных значений энергии электронов. Рассчитанная зависимость проникаемости барьера из алюминия толщиной 4 см от энергии для монохроматического пучка электронов изображена на рис. 3,б.

Для определения энергии на графике проводится линия параллельная оси абсцисс на уровне $T_{\text{экс.}}$, находится точка пересечения с кривой $T_{\text{расч.}}(E_e)$ и находится значение E_e , соответствующее точке пересечения.

Описанная методика измерения энергии для каждого конкретного типа ускорителя, в совокупности с другими показателями, характеризующими его качества,

*E-mail: lub.ovch@yandex.ru

†E-mail: shvedunov@gmail.com

‡E-mail: taras.v.bondarenko@gmail.com

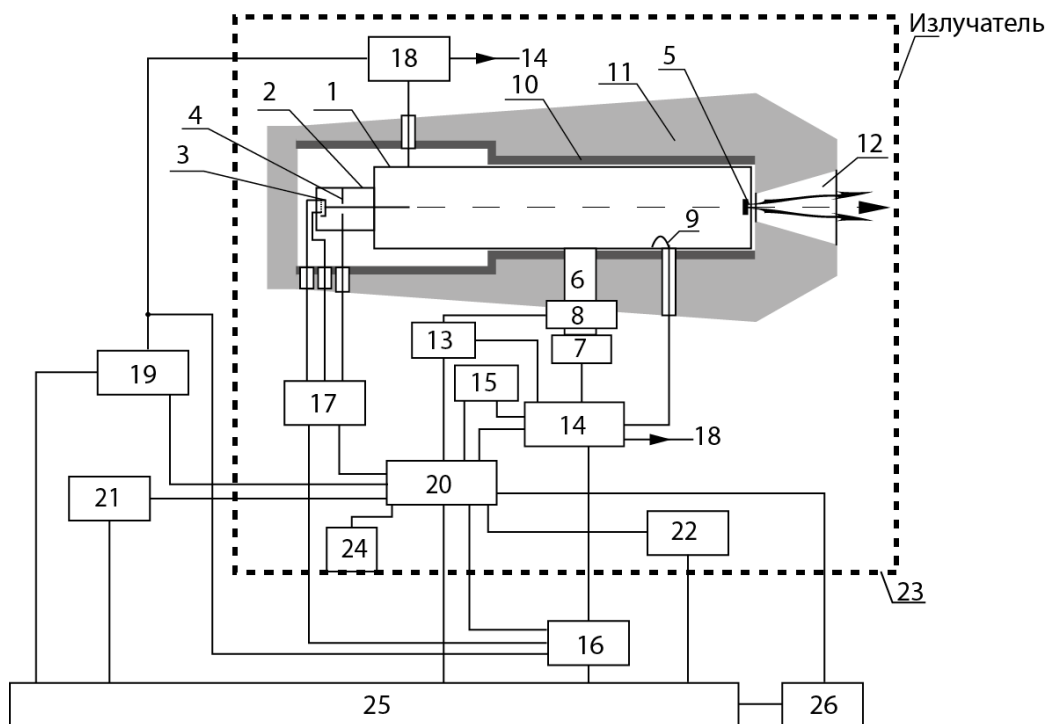


Рис. 1: Структурная схема стенда. 1 — ускоряющая структура, 2 — электронная пушка, 3 — катод пушки, 4 — управляющий электрод пушки, 5 — тормозная мишень, 6 — питающий волновод, 7 — вакуумное высокочастотное окно, 8 — электроразрядный вакуумный насос, 9 — высокочастотная антенна (петля связи), 10 — магнитный экран, 11 — радиационная защита, 12 — коллиматор, 13 — блок питания электроразрядных насосов ускоряющей структуры и клистрона, 14 — система высокочастотного питания, 15 — система подачи изолирующего газа, 16 — модулятор, 17 — система питания пушки, 18 — система распределения охлаждающей жидкости, 19 — модуль охлаждения, 20 — система контроля и управления, 21 — панель управления, 22 — блок питания собственных нужд, 23 — рама, 24 — блокировка безопасности, 25 — электропитание, 26 — удалённый контроль

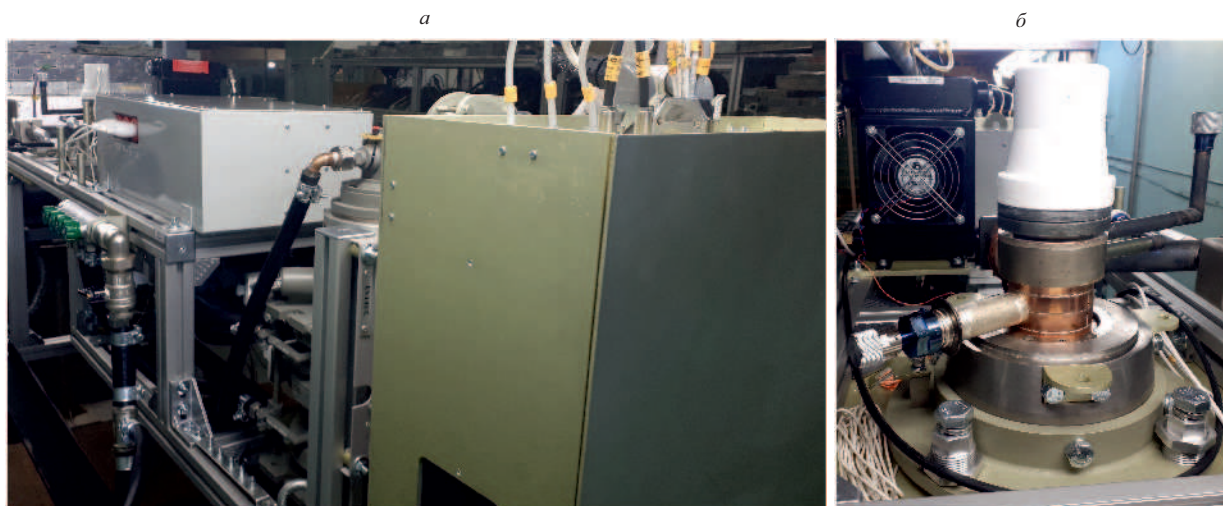


Рис. 2: Фото стенда для измерения характеристик тормозного излучения. *а* — Общий вид. *б* — ускоряющая система

например, проникающей способностью излучения при получении изображения объекта, вполне соответствует требованиям назначения ускорителя. Однако, при проведении сравнения измеренной энергии с энергией, полученной, в результате расчёта динамики пучка

в ускоряющей структуре при определённых затратах СВЧ мощности, возникает неопределённость в интерпретации результатов, обусловленная немонахроматичностью пучка электронов линейного ускорителя.

Было проведено упрощённое моделирование с ис-

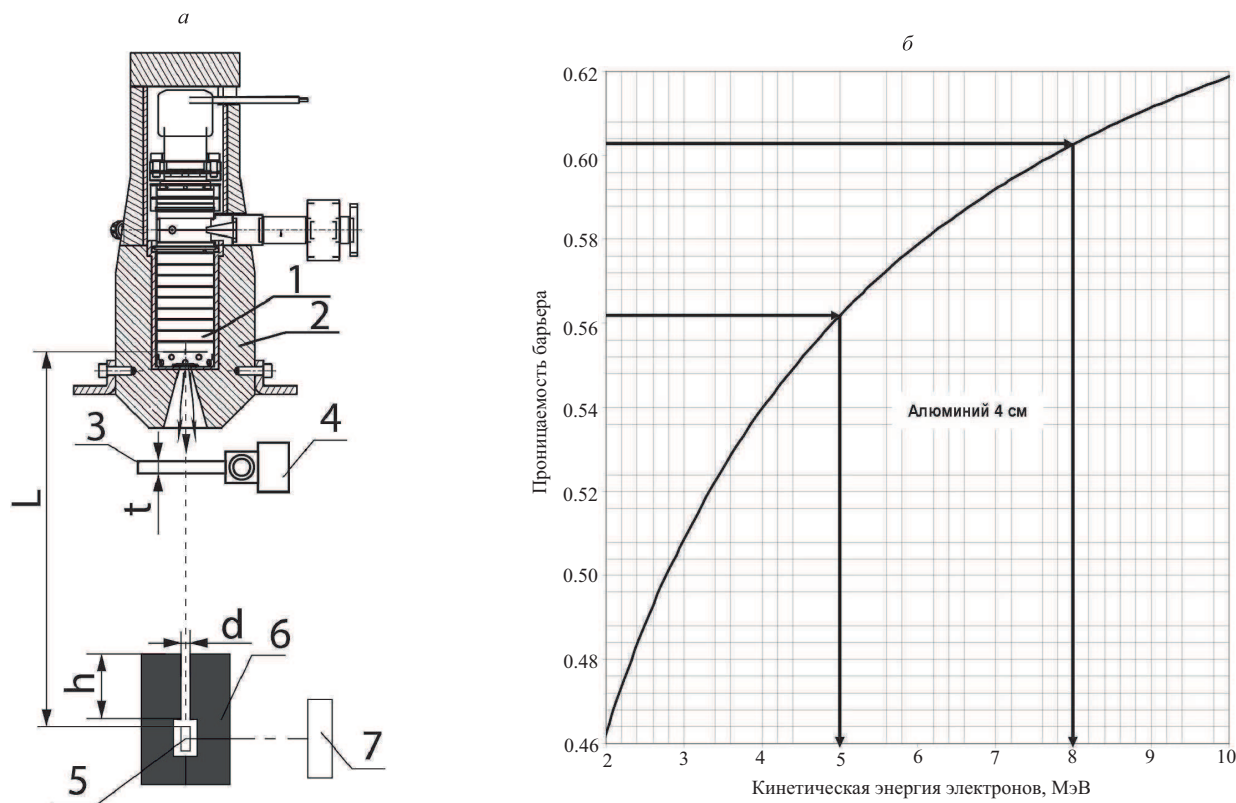


Рис. 3: а — Измерение верхней границы спектра тормозного излучения. 1 — ускоряющая система, 2 — радиационная защита с коллиматором, 3 — поглощающий барьер, 4 — устройство перемещения, 5 — ионизационная камера, 6 — коллиматор ионизационной камеры, 7 — дозиметр ДКС 101; б — Зависимость проицаемости барьера из алюминия толщиной 40 мм от кинетической энергии монохроматического пучка электронов

пользованием аналитического выражения для спектра тормозного излучения процедуры измерения энергии немонохроматического пучка электронов методом ослабления тормозного излучения поглощающим барьером [5].

В качестве примера были использованы расчётные спектры пучка, варьирование ширины которых достигалось изменением энергии инжектируемого пучка при постоянном уровне ускоряющего поля.

На рис. 4 показаны спектры пучка для нормировки поля, обеспечивающей энергию в максимуме спектра около 5.5 МэВ, для трёх значений энергии инжекции 23, 25 и 27 кэВ. В табл. 1 суммированы данные по величинам средней энергии, энергии максимума спектра и энергия, оценённая по проицаемости барьера.

Как следует из приведённых данных, с ростом энергии инжекции энергия максимума спектра не изменяется, однако при этом происходит увеличение средней энергии пучка за счёт концентрации частиц вблизи максимума спектра. Подобное изменение характера спектра вполне подходит для рассматриваемой в данной работе модельной задачи. Следует подчеркнуть, что при расчёте ускорителя и расчёте затрат СВЧ мощности на достижение заданной энергии за основу берётся именно энергия максимума спектра.

Для учёта энергетического спектра пучка электро-

нов при расчёте проицаемости барьера был рассчитан тормозной спектр как сумма тормозных спектров электронов различной энергии в соответствии с их весами в спектре.

$$T(E_{\max}, t) = \frac{\int_0^{E_{\max}} k \mu_{2>74}(k) [\sum_{i=1}^N \alpha_i S(E_i, k)] e^{-\mu(k)t} dk}{\int_0^{E_{\max}} k \mu_{2>74}(k) [\sum_{i=1}^N \alpha_i S(E_i, k)] dk} \quad (3)$$

где E_{\max} — энергия верхней границы спектра электронов, N — число разбиений гистограммы спектра, α_i — доля электронов с энергией E_i в спектре, $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$.

На рис. 5,а показаны спектры тормозного излучения, рассчитанные для монохроматического пучка с энергией равной энергии максимума спектра электронов, а также для спектров электронов для энергий инжекции 23, 25 и 27 кэВ, показанных на рис. 4.

На рис. 5,б показана зависимость от энергии проицаемости барьера из алюминия толщиной 40 мм, рассчитанная с помощью выражения (2) для монохроматического пучка, а также значения проицаемости, полученные с помощью выражения (3) для энергий инжекции 23, 25 и 27 кэВ. Как следует из рис. 5,б, если для оценки энергии для немонохроматических пучков использовать кривую проицаемости для мо-

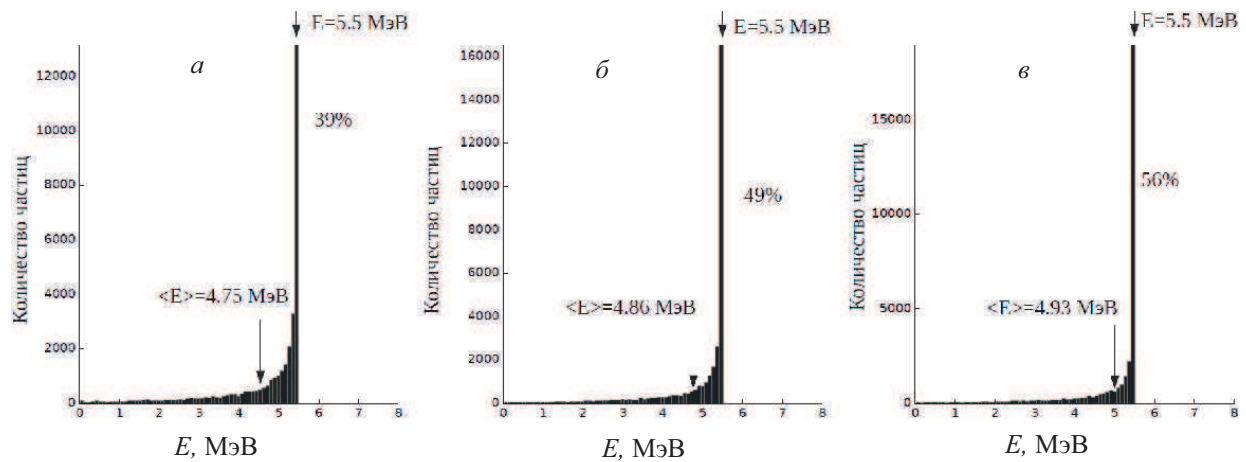


Рис. 4: Расчётные спектры для трёх энергий инжекции пучка в ускоритель, *a* — 23 кэВ, *б* — 25 кэВ и *в* — 27 кэВ. Указаны значения энергии максимума спектра, средней энергии спектра, а также процент числа частиц, содержащихся в столбце гистограммы, соответствующем максимуму спектра

Таблица I: Характеристики пучка для трёх энергий инжекции

Энергия инжекции, кэВ	Средняя энергия, МэВ	Энергия максимума спектра, МэВ	Оценка энергии по проницаемости барьера, МэВ
23	4.75	5.5	4.89
25	4.86	5.5	5.06
27	4.93	5.5	5.11

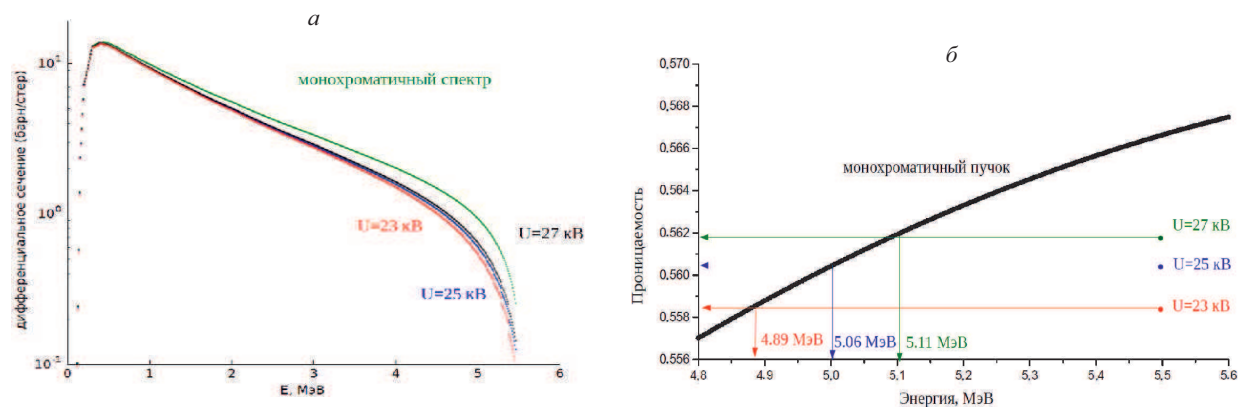


Рис. 5: *a* — Спектры тормозного излучения: зелёная кривая — монохроматический пучок с энергией равной энергии максимума спектра (5.5 МэВ), чёрная, синяя и красная кривые — соответственно, для энергий инжекции 23, 25 и 27 кэВ; *б* — Зависимость проницаемости барьера от энергии пучка

нохроматического пучка, то они составят 4.89, 5.06 и 5.11 МэВ, соответственно, для энергий инжекции 23, 25 и 27 кэВ. Соотношение энергий максимума спектра, средней энергии и оценённой энергии суммированы в табл. 1 и показаны на рис. 6.

Таким образом, как следует из результатов расчётов, выполненных для трёх различных спектров пучка электронов, оценка энергии методом проницаемости барьера зависит от формы спектра и ближе к средней

энергии, нежели к энергии максимума спектра, которая в расчётах динамики пучка и оценке затрат СВЧ мощности на создание ускоряющего поля рассматривается в качестве основной характеристики. Для конкретных спектров, рассмотренных в данном разделе, оценка энергии на 3%–4% выше средней энергии и на 8–11% ниже энергии максимума спектра.

В соответствие с формулой (1) мощность дозы тормозного излучения пропорциональна среднему току

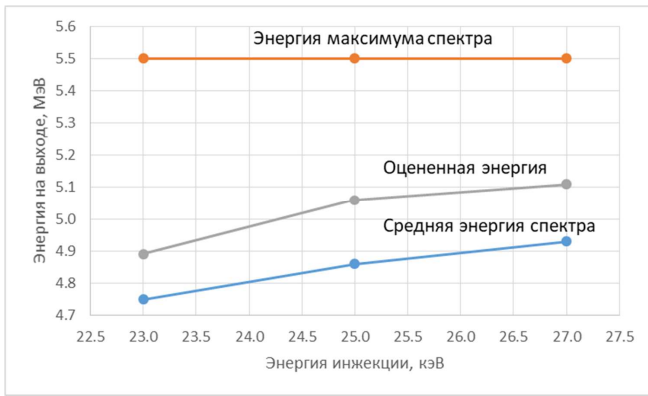


Рис. 6: Соотношение энергий пучка

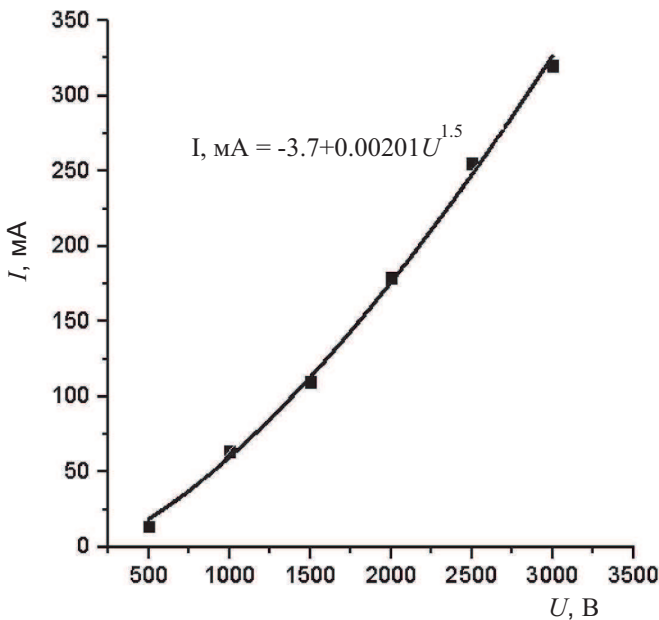


Рис. 7: Измеренная вольтамперная характеристика электронной пушки

и третьей степени энергии ускоренного электронного пучка. Нами были проведены измерения мощности дозы для различных уровней выходной мощности клистрона и тока электронной пушки. Изменение тока электронной пушки обеспечивалось изменением напряжения на управляющем электроде. На рис. 7 показана измеренная вольтамперная характеристика электронной пушки. Изменения проводились при напряжении на катоде -25 кВ. Зависимость тока пушки от напряжения на управляющем электроде, U_{CE} , описывается выражением:

$$I_{gun} \approx 2.01 \times 10^{-6} U_{CE}^{1.5} (\text{A}). \quad (4)$$

В целом, эта зависимость близка к расчётной, представленной на рис. 9,а.

Измерения проводились с экземпляром клистрона, отличающимся по параметрам от клистрона, использо-

вавшегося на стенде измерений характеристик электронного пучка. Его максимальная выходная СВЧ мощность составляла 2.9 МВт при $U_{HVPS} = 1300$ В. С учётом измеренных значений КПД и первеанса, выходная мощность данного экземпляра клистрона зависела от значения U_{HVPS} приблизительно следующим образом:

$$P_{kl} \approx 0.048 U_{CE}^{2.5} (\text{Вт}). \quad (5)$$

С учётом формул (1) и (3) имеем следующую расчётную зависимость мощности дозы от мощности клистрона и тока пушки:

$$D = \frac{0.33 I_{gun} K_{capt}(E)}{q(1 + \beta)^2} \times \left\{ \sqrt{4\beta Z_e(E) P_{kl}} - I_{gun} K_{capt}(E) Z_e(E) \right\}^2 \quad (6)$$

Измерения, результаты которых приведены ниже, проводились для различных уровней мощности клистрона при изменении тока пушки в широких пределах, соответственно, при значительном изменении энергии. В этой связи, из-за зависимости эффективно-шунтового сопротивления и коэффициента захвата от энергии для расчёта мощности дозы по формуле (6) необходимо решать нелинейное уравнение.

Зависимость мощности дозы от тока ускоренного пучка, $I_{gun} K_{capt}(E)$, определяется конкуренцией двух факторов — возрастанием тока и снижением энергии из-за нагрузки током пучка. В качестве иллюстрации на рис. 8 приведены результаты расчёта зависимости мощности дозы и энергии пучка от ускоренного тока для двух значений коэффициента связи в предположении независимости коэффициента захвата и эффективного шунтового сопротивления от энергии.

На рис. 9,а приведены результаты измерения мощности дозы на расстоянии 1 м от тормозной мишени в зависимости от напряжения на управляющем электроде для различных значений напряжения модулятора. Измерения проводились при скважности около 6000 . Следует отметить, что в соответствии с формулой (4) значению, $U_{CE} = 500$ В соответствует ток пушки около 22 мА, $U_{CE} = 3000$ В — около 330 мА. В соответствии с формулой (5) значению $U_{HVPS} = 850$ В соответствует выходная мощность клистрона 1 МВт, $U_{HVPS} = 1300$ В (предельное значение для модулятора) — 2.9 МВт. В пересчёте на проектную скважность около 840 максимальная мощность дозы для клистрона с максимальной выходной мощностью 2.9 МВт составляет около 4 Гр/мин.

Для достижения проектной мощности дозы 10 Гр/мин необходимо либо увеличивать максимальную импульсную мощность клистрона, либо уменьшать скважность за счёт увеличения длительности импульса. Зависимость мощности дозы от длительности импульса высокого напряжения клистрона для тока пушки 250 мА и $U_{HVPS} = 1300$ В, частоты следования импульсов 100 Гц, показана на рис. 9,б.

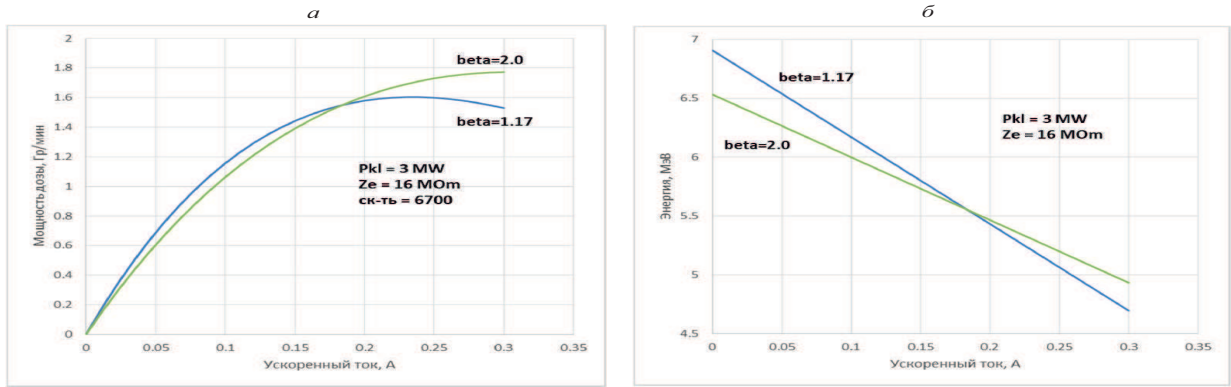


Рис. 8: Результаты расчёта зависимости мощности дозы (а) и энергии пучка (б) от ускоренного тока при постоянном значении эффективного шунтового сопротивления для мощности клистрона 3 МВт и двух значений коэффициента связи ускоряющей структуры с питающим волноводом

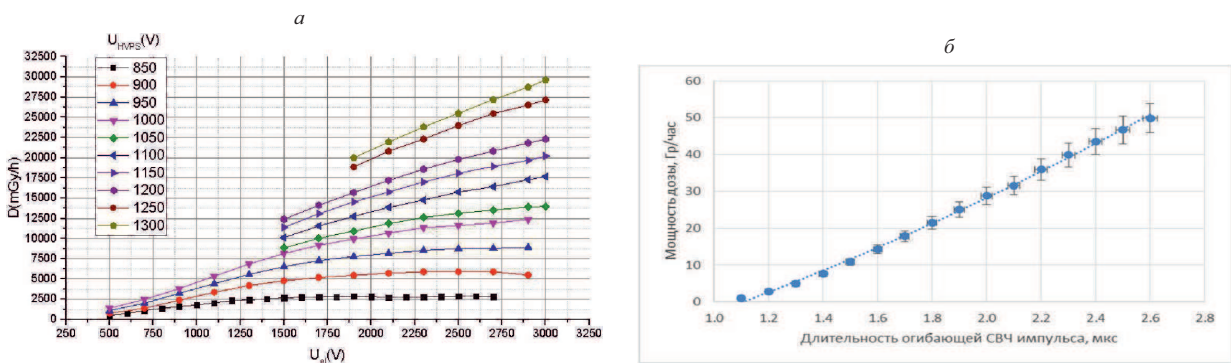


Рис. 9: а — Результаты измерения мощности дозы в зависимости от напряжения на управляющем электроде для различных значений; б — Зависимость мощности дозы от длительности импульса высокого напряжения клистрона для тока пушки 250 мА и $U_{HVPS} = 1300$ В, частоты следования импульсов 100 Гц напряжения модулятора

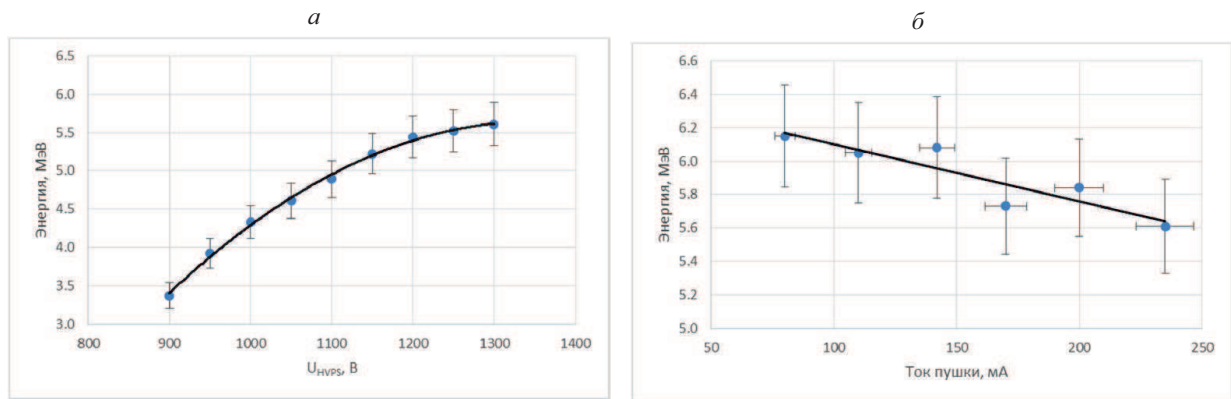


Рис. 10: Результаты измерения верхней границы тормозного спектра (а) в зависимости от U_{HVPS} для тока пуки 235 мА, (б) в зависимости от тока пушки для $U_{HVPS} = 1300$ В

Для достижения проектной мощности дозы для импульсной мощности клистрона 2.9 МВт, длительность импульса должна быть увеличена до 5 мкс.

На рис. 10 показаны результаты измерения верхней границы тормозного спектра методом поглощающего барьера в зависимости от U_{HVPS} для тока пуки 235 мА

и в зависимости от тока пушки для $U_{HVPS} = 1300$ В. Выход на проектную энергию 6 МэВ при максимальной мощности клистрона возможен при токе пушки не более 100 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа подготовлена в рамках выполнения соглашения между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии № 14.582.21.0011 от 03.10.17 г.

«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.

- [1] http://www.doza.ru/docs/radiation_control/dks_101.pdf
[2] ГОСТ 24034-80
[3] Schiff L. I. // Phys. Rev. 1951. **83**. P. 252. Формула (1).
[4] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

- [5] Овчинникова Л. Ю., В. И. Шведун // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2018. № 1. 1810202.

Investigation of characteristics of bremsstrahlung of medical accelerator for complex of radiation therapy KLT-6

L. Yu Ovchinnikova^{1,2,a}, V. I. Shvedunov^{1,2,b}, T. V. Bondarenko³, I. L. Dergacheva³, A. N. Ermakov^{1,2}, V. V. Khankin^{1,2}, D. S. Yurov^{1,2}

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

²Laboratory of electron accelerators MSU Ltd, Moscow 119991, Russia

³Research Institute of Technical Physics and Automation JSC, Moscow 115230, Russia

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

Experiments were carried out to measure the main characteristics of bremsstrahlung, dose rate and upper limit of energy spectrum.

PACS: 29.20.+c

Keywords: bremsstrahlung, electron accelerator, radiation therapy complex.

Received 02 July 2019.

Сведения об авторах

1. Овчинникова Любовь Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: lub.ovch@yandex.ru.
2. Шведун Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shvedunov@gmail.com.
3. Бондаренко Тарас Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, руководитель группы; e-mail: taras.v.bondarenko@gmail.com.
4. Дergacheva Ирина Леонидовна — науч. сотрудник; e-mail: irina.l.dergacheva@gmail.com.
5. Ермаков Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: a_ermakov1978@mail.ru.
6. Ханкин Вадим Валерьевич — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: v-k32@yandex.ru.
7. Юров Дмитрий Сергеевич — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: d_yurov88@mail.ru.