

Влияние энергетического спектра пучка электронов на оценку его энергии методом ослабления тормозного излучения поглощающим барьером

Л. Ю. Овчинникова^{1,2*}, В. И. Шведун^{1,2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ» (ООО «ЛЭУ МГУ»)

(Статья поступила 13.10.2017; Подписана в печать 15.11.2017)

Проведено моделирование процедуры измерения энергии немонахроматического пучка электронов методом ослабления тормозного излучения поглощающим барьером с использованием аналитического выражения для спектра тормозного излучения. Выполнено сравнение значения энергии, измеряемой данным методом, со средней энергией и энергией максимума спектра электронного пучка. Показано, что оценка энергии, полученная методом ослабляющего барьера, зависит от формы энергетического спектра электронов и ближе к средней энергии, нежели к энергии максимума спектра, которая, как правило, является основным оптимизируемым параметром при расчете динамики пучка в ускорителе.

PACS: 29.20.Ej, 29.27.Fh

УДК: 621.384.6

Ключевые слова: ускоритель электронов, тормозное излучение, измерение энергии пучка.

ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов в области энергий до 10 МэВ, генерирующие тормозное излучение, широко используются в радиологии и инспекционно-досмотровых комплексах. Обычно, такие ускорители имеют «отпаянную» конструкцию с тормозной мишенью, расположенной в вакууме, что не позволяет вывести пучок электронов в какую-либо диагностическую систему для измерения его параметров.

При проведении работ по калибровке таких ускорителей для определения энергии пучка электронов часто используют методику ослабления интенсивности тормозного излучения поглощающим барьером. Как правило, измерения проводятся в геометрии близкой к геометрии узкого пучка, при которой на детектор попадают только кванты тормозного излучения, не испытавшие взаимодействия с барьером. Для оценки энергии пучка электронов используют расчетную кривую проникаемости барьера, полученную для моноэнергетического пучка.

Подобная методика калибровки для каждого конкретного типа ускорителя, в совокупности с другими показателями, характеризующими его качества, например, проникающей способностью излучения при получении изображения объекта, вполне соответствует требованиям назначения ускорителя. Однако, при проведении сравнения измеренной энергии с энергией, полученной, в результате расчета динамики пучка в ускоряющей структуре при определенных затратах СВЧ мощности, возникает неопределенность в интерпретации результатов, обусловленная немонахроматичностью пучка электронов линейного ускорителя.

Энергетический разброс пучка электронов линейного ускорителя возникает по двум причинам. Во-первых, он обусловлен физическими процессами при захвате в режим ускорения высокочастотным полем непрерывного пучка электронной пушки. Во-вторых, у импульсного ускорителя, наличием фронтов импульсов СВЧ энергии, поступающей на вход ускоряющей структуры и конечным временем установления и спада ускоряющего поля в ней. В первом случае энергетический разброс может быть минимизирован за счет оптимизации ускоряющей структуры, во втором, за счет выбора времени инжекции пучка электронов от пушки. Указанные меры принимаются в специальных случаях, требующих высокого качества электронного пучка. Они могут существенно усложнить ускоритель и увеличить его стоимость, поэтому для указанных выше применений ускоренный пучок электронов имеет значительный энергетический разброс.

В настоящей работе проведено упрощенное моделирование с использованием аналитического выражения для спектра тормозного излучения процедуры измерения энергии немонахроматического пучка электронов методом ослабления тормозного излучения поглощающим барьером для ускорителя на энергию 6 МэВ, выполнено сравнение значения измеряемой данным методом энергии со средней энергией и энергией максимума спектра.

1. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИМ БАРЬЕРОМ

В геометрии узкого пучка проникаемость T барьера толщиной t при прохождении через него тормозного излучения, генерируемого монохроматическим пучком электронов с кинетической энергией E_e , есть отношение мощности дозы, измеренной детектором, в каче-

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

†E-mail: shvedunov@gmail.com

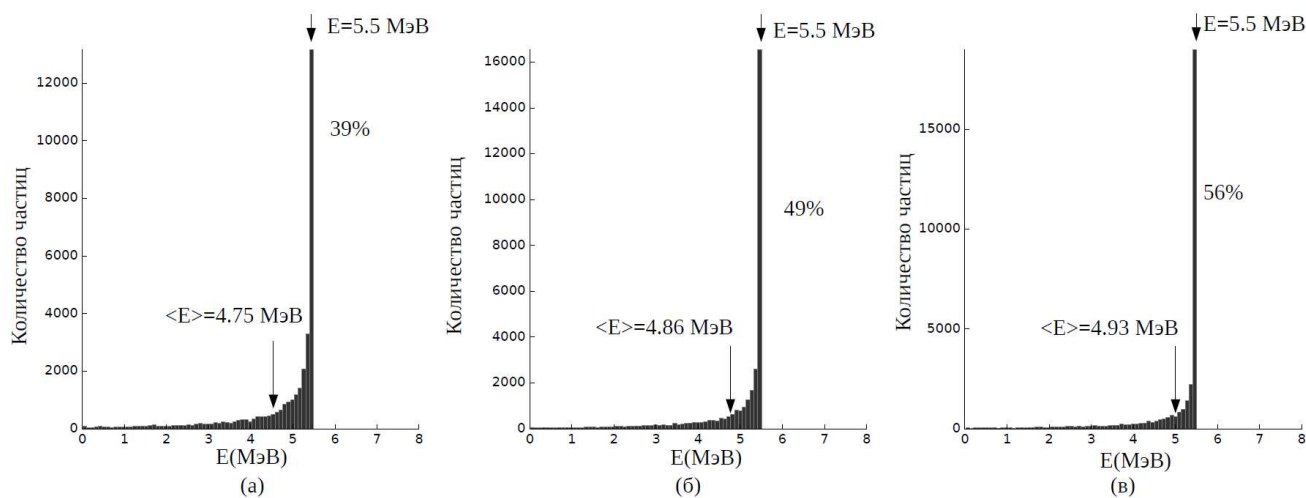


Рис. 1: Расчётные спектры для трёх энергий инжекции пучка в ускоритель, (а) $U_0 - 8\%$, (б) U_0 и (в) $U_0 + 8\%$. Указаны значения энергии максимума спектра, средней энергии спектра, а также процент числа частиц, содержащихся в столбце гистограммы, соответствующем максимуму спектра

Таблица I: Характеристики пучка для трёх энергий инжекции

Энергия инжекции	Средняя энергия, МэВ	Энергия максимума спектра, МэВ	Оценка энергии по проникаемости барьера, МэВ
$U_0 - 8\%$	4.75	5.5	4.89
U_0	4.86	5.5	5.06
$U_0 + 8\%$	4.93	5.5	5.11

стве которого здесь мы рассматриваем ионизационную камеру, с установленным барьером и без него:

$$T(E_e, t) = \frac{\int_0^{E_e} k \mu_{\text{возд}}(k) S(E_e, k) e^{-\mu(k)t} dk}{\int_0^{E_e} k \mu_{\text{возд}}(k) S(E_e, k) dk} \quad (1)$$

где k — энергия квантов тормозного излучения, $S(E_e, k)$ спектр тормозного излучения под углом близким к 0° , полученный на основании формулы Шиффа [1] с учетом поглощения в тормозной мишени, в слое воздуха между мишенью и детектором, и в иных препятствиях, расположенных на пути пучка, за исключением поглощающего барьера, $\mu(k)$ и $\mu_{\text{возд}}(k)$, соответственно, линейные коэффициенты поглощения материала барьера и воздуха ионизационной камеры [2].

Для определения энергии в качестве левой части уравнения (1) используется экспериментально измеренная величина проникаемости $T_{\text{эксп}}$. Правая часть, $T_{\text{расч}}(E_e)$, рассчитывается для поглощающего барьера с известными t и Z для различных значений энергии электронов.

2. ПРИМЕРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

В качестве примера будем использовать расчётные спектры пучка для линейного ускорителя электронов на диапазон энергий 3–6 МэВ, разработанного ЛЭУ МГУ. Варьирование ширины энергетического спектра достигалось изменением энергии инжектируемого пучка при постоянном уровне ускоряющего поля.

На рис. 1 показаны спектры пучка для нормировки поля, обеспечивающей энергию в максимуме спектра, для трёх значений энергии инжекции $U_0 - 8\%$, U_0 и $U_0 + 8\%$. Спектры рассчитаны с использованием пакета программ CST [3]. В Таблице I суммированы данные по величинам средней энергии, энергии максимума спектра и энергии, оцененной по проникаемости барьера.

Как следует из приведенных данных, с ростом энергии инжекции энергия максимума спектра не изменяется, однако при этом происходит увеличение средней энергии пучка за счет концентрации частиц вблизи максимума спектра. Подобное изменение характера спектра вполне подходит для рассматриваемой в данной работе модельной задачи. Подчеркнем, что при проектировании ускорителя и расчете затрат СВЧ

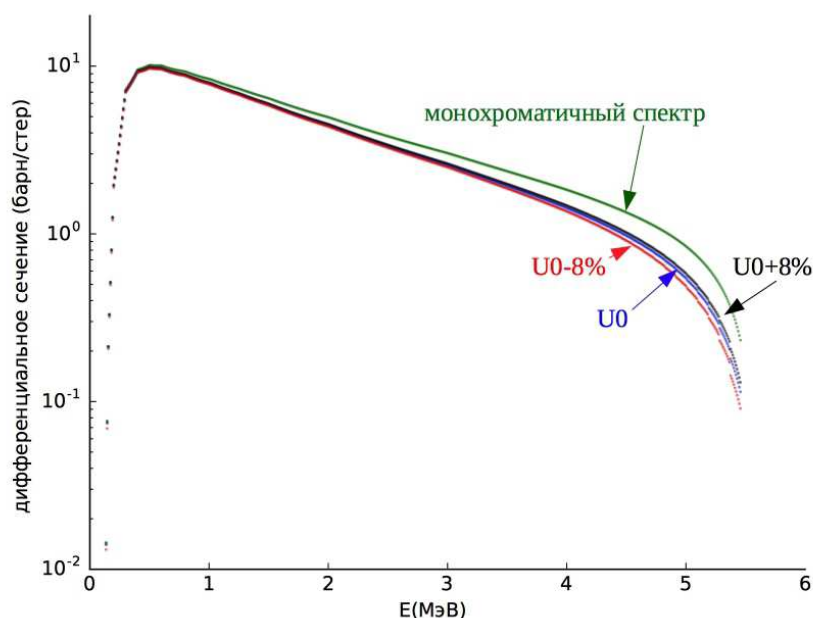


Рис. 2: Спектры тормозного излучения: зеленая кривая — монохроматический пучок с энергией равной энергии максимума спектра (5.5 МэВ), красная, синяя и чёрная кривые — соответственно, для энергий инжекции $U_0 - 8\%$, U_0 и $U_0 + 8\%$

мощности на достижении заданной энергии за основу берется именно энергия максимума спектра.

3. СООТНОШЕНИЕ ОЦЕНЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ СО СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ И ЭНЕРГИЕЙ МАКСИМУМА СПЕКТРА

Для учёта энергетического спектра пучка электронов при расчете проникаемости барьера рассчитаем тормозной спектр как сумму тормозных спектров электронов различной энергии в соответствии с их весами в спектре.

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

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. 2 показаны спектры тормозного излучения, рассчитанные для монохроматического пучка с энергией равной энергии максимума спектра электронов, а также для спектров электронов для энергий инжекции $U_0 - 8\%$, U_0 и $U_0 + 8\%$, показанных на рис. 1.

На рис. 3 показана зависимость от энергии проникаемости барьера из алюминия толщиной 40 мм, рассчитанная с помощью выражения (1) для монохроматического пучка, а также значения проникаемости, полученные с помощью выражения (2). Как следует из рис. 3, если для оценки энергии для немонохроматических пучков использовать кривую проникаемости для монохроматического пучка, то они составят 4.89, 5.06 и 5.11 МэВ, соответственно, для энергий инжекции $U_0 - 8\%$, U_0 и $U_0 + 8\%$. Соотношение энергий максимума спектра, средней энергии и оцененной энергии суммированы в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из результатов расчетов, выполненных в данной работе для трех различных спектров пучка электронов, оценка энергии методом проникаемости барьера зависит от формы спектра и ближе к средней энергии, нежели к энергии максимума спектра, которая в расчетах динамики пучка и оценке затрат СВЧ мощности на создание ускоряющего поля рассматривается в качестве основной характеристики. Для конкретных спектров, рассмотренных в данной работе, оценка энергии на 3–4% выше средней энергии и на 8–11% ниже энергии максимума спектра.

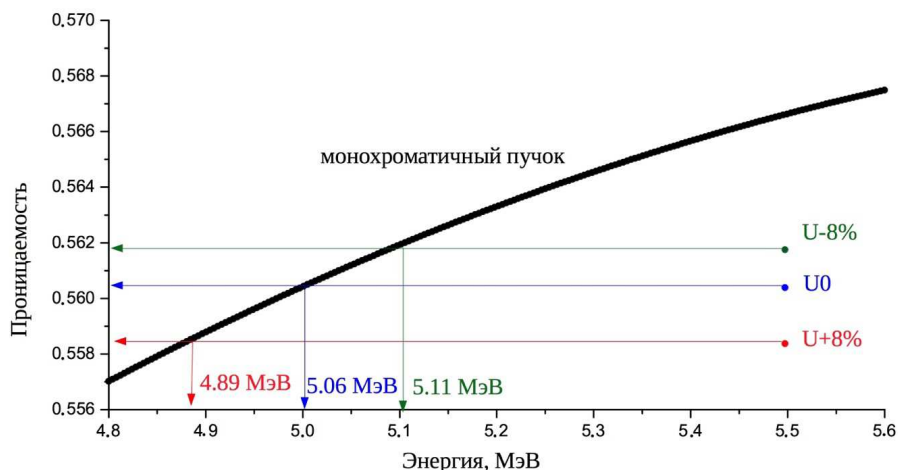


Рис. 3: Зависимость проницаемости барьера от энергии пучка

- [1] Schiff L. I. Phys. Rev. 1951. **83**, N 2. P. 252.
 [2] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
 [3] <https://www.cst.com>

Influence of the energy spectrum of an electron beam on the estimation of its energy by the method of attenuation of bremsstrahlung by an absorbing barrier

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

¹M. V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU),

²«Laboratory of electron accelerators MSU Ltd» («LEA MSU Ltd»)

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

The procedure for measuring the energy of a nonmonochromatic electron beam by the method of attenuating bremsstrahlung by an absorbing barrier is simulated using the analytical expression for the bremsstrahlung spectrum. The energy value measured by this method is compared with the mean energy and energy of the maximum of the electron beam spectrum. It is shown that the energy estimate obtained by the attenuation barrier method depends on the form of the electrons energy spectrum and is closer to the average energy than to the energy of the maximum of the spectrum, which, as a rule, is the main optimized parameter in calculating beam dynamics in the accelerator.

PACS: 29.20.Ej, 29.27.Fh

Keywords: electron accelerator, bremsstrahlung, beam energy measurement.

Received 13 October 2017.

Сведения об авторах

- Овчинникова Любовь Юрьевна — м.н.с.; тел.: (495)939-56-31, e-mail: lub.ovch@yandex.ru.
- Шведунوف Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495)939-24-51, e-mail: shvedunov@gmail.com.