

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.634,539.1.07

ТЕСТОВЫЕ ПУЧКИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ФИАН “ПАХРА”

© 2020 г. В. И. Алексеев^а, В. А. Басков^а, В. А. Дронов^а, А. И. Львов^а, И. А. Мамонов^{а, *},
В. В. Полянский^а, С. С. Сидорин^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, 119333 Россия

*E-mail: ilyha.mamonov@gmail.com

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.

После доработки 03.08.2020 г.

Принята к публикации 03.08.2020 г.

Представлены характеристики создаваемых пучков ускорительного комплекса ФИАН “Пахра” по состоянию на ноябрь 2019 г. – выведенного электронного пучка и пучка вторичных электронов/позитронов – для тестирования и калибровок детекторов, применяемых в крупных ускорительных и астрофизических экспериментах. При энергиях 250–500 МэВ выведенного в зал № 1 из синхротрона С-25Р электронного пучка его энергетическое разрешение составляет $\delta \sim 1\%$, а интенсивность может меняться коллиматорами в диапазоне $10^3\text{--}10^{10}\text{ с}^{-1}$. Квазимонохроматический пучок вторичных электронов, созданный в зале № 2, типично имеет энергию в диапазоне 50–300 МэВ, энергетическое разрешение соответственно $\delta = 14\text{--}2\%$, а интенсивность $\sim 10^2\text{ с}^{-1}$. Проведенное моделирование характеристик вторичного позитронного пучка позволило выбрать оптимальную геометрию установки и показало хорошее согласие с полученными затем экспериментальными данными.

Ключевые слова: электронный синхротрон, тестовые пучки, выведенный электронный пучок, вторичный электронный пучок, энергетическое разрешение, интенсивность, моделирование

DOI: 10.1134/S2079562920040016

1. ВВЕДЕНИЕ: УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ФИАН “ПАХРА” С-25Р

В экспериментальной работе по ядерной физике, физике частиц, астрофизике часто возникает необходимость в калибровке детекторов и обору-дования. Электронные и фотонные пучки средних энергий требуются и для решения ряда смежных задач, таких как исследования структуры материалов, радиационной стойкости электронных компонентов, измерения сечений ядерных процессов для гражданского и оборонного применения, и т. д. Для этих целей необходимы ускорители, генерирующие пучки.

Электронный синхротрон ФИАН С-25Р в г. Троицке (ускорительный комплекс “Пахра”) был спроектирован в середине 1960-х годов на максимальную энергию электронов 1.2 ГэВ, запущен к середине 1970-х и в основном предназначался для использования в ядерно-физических экспериментах на тормозном гамма-пучке и на выведенном (с медленным выводом) электронном пучке в энергетическом диапазоне выше порога рождения π -мезонов. В настоящее время ориентация работ изменилась, отчасти потому что реализация крупных международных проектов (астрофизическая обсерватория ГАММА-400, установки SPD, MPD и BMN проекта NICA,

эксперименты на Нуклотроне в Дубне) потребовала недорогих инструментальных средств тестирования на основе действующих ускорителей средних энергий.

Синхротрон С-25Р в настоящее время является практически единственным в России постоянно работающим ускорителем, генерирующим пучки электронов, позитронов и фотонов с энергиями до 850 МэВ. В соответствии с существующими потребностями возникла задача возродить и модернизировать когда-то существовавший магнитооптический канал выведенного высокоинтенсивного электронного пучка, а на основе тормозного фотонного пучка вновь создать менее интенсивный тестовый пучок вторичных электронов (позитронов).

Синхротрон С-25Р имеет четыре секции поворотных магнитов с прямолинейными промежутками между ними. Радиус равновесной орбиты на поворотных участках составляет 400 см, длина каждого прямолинейного промежутка 190 см. Инжектором синхротрона является микротрон с выходной энергией 7.4 МэВ. После вывода из микротрона пучок формируется электронно-оптическим трактом и при помощи магнитного инфлектора вводится в камеру синхротрона. Частота изменения магнитного поля синхротрона составляет 50 Гц. Инжекция электронов в синхро-

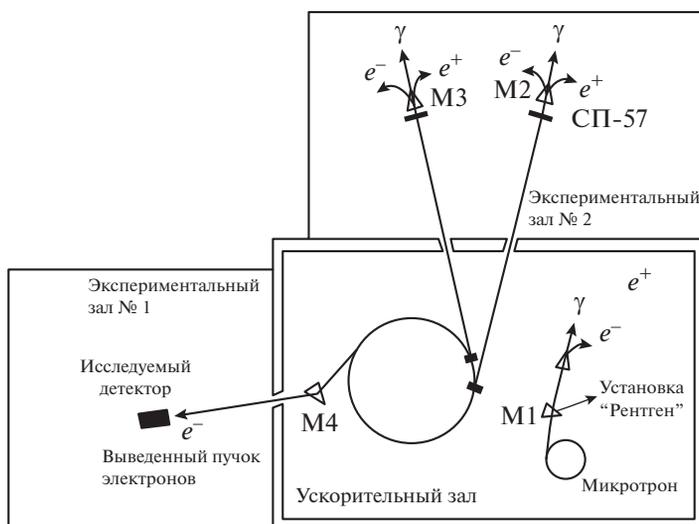


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса ФИАН “Пахра”. M1 и M4 – поворотные магниты; M2 и M3 – спектрометрические магниты.

трон осуществляется при индукции магнитного поля в поворотных магнитах $B_i = 0.0060$ Тл. Максимальная энергия электронов достигается при $B_{\max} = 1$ Тл. Резонатор ускорителя возбуждается на частоте 55 МГц.

2. ТЕСТОВАЯ ЗОНА ЗАЛА № 1

Для тестирования детекторов и оборудования крупных современных установок была создана калибровочная (тестовая) зона в зале № 1. Созданный в 1980-е годы канал медленного вывода электронов ускорителя С-25Р [1] пришлось геометрически перестроить и юстировать после установки специального компенсатора с целью уменьшения влияния краевого поля синхротрона. Главными преимуществами тестовой зоны в зале № 1 (на базе канала медленного вывода) по сравнению с описываемой ниже тестовой зоной в зале № 2 (на базе вторичного электронного или позитронного пучка) являются низкофонные условия работы экспериментальных установок, лучшее энергетическое разрешение и, при необходимости, высокие интенсивности электронного пучка.

Выведенный электронный пучок из синхротрона С-25Р формируется системой медленного вывода и протяженным (~25 м) магнитооптическим каналом (МОК).

Медленный вывод

Медленный вывод электронов с использованием резонанса радиальных бетатронных колебаний четвертого порядка ($\nu_x = 3/4$) реализован с

помощью двух полюсных обмоток ускорителя и двух выводных септум-магнитов [1]. Зазор магнитопроводов обоих септум-магнитов имеет высоту 1.2 см и ширину 3.5 см. Индукция магнитного поля в зазоре первого септум-магнита 0.08 Тл, а в зазоре второго септум-магнита достигает 0.4 Тл. Положение обоих септум-магнитов относительно центральной орбиты можно менять с помощью системы перемещения в диапазоне 0–5 см.

Магнитооптический канал (МОК)

Электронный пучок через выходное окно ускорителя (алюминиевую пластину толщиной 0.2 мм) и воздушный промежуток длиной 0.7 м вводится в тракт МОК – рис. 2. Электронный тракт МОК вакуумирован, диаметр тракта в местах нахождения линз составляет 38 мм, а в межлинзовых промежутках – 80 мм. Общая длина тракта от выходного окна ускорителя в ускорительном зале до магнита СП-57 в зале № 1 составляет ~25 м. Канал включает 4 линзы, один поворотный магнит СП-3 в зале ускорителя с размером полюса 500×200 мм² и межполюсным расстоянием 50 мм. Нужный угол поворота пучка 18.5° достигается при индукции поля магнита $B_{\text{СП-3}} \approx 0.6$ Тл для электронов с энергией $E_0 = 350$ МэВ. Контроль правильности прохождения пучка осуществляется пучковыми пропорциональными камерами, а также установленными радиаторами и видеокамерами.

Компенсатор магнитного поля (КМП)

Одним из ключевых элементов канала является устройство, предназначенное для коррекции первоначально разработанной схемы вывода, а

именно для исключения влияния на электронный пучок краевого магнитного поля магнита ускорителя — компенсатор магнитного поля (КМП). После выхода из ускорителя пучок проходит 70 см вблизи полюса магнита ускорителя, краевое переменное поле которого ($B_{\max} \sim 0.4$ Тл) сильно "растягивает" пучок в горизонтальной плоскости. При попадании пучка в КМП влияние поля прекращается, и он без искажений транспортируется к первой линзе и далее в зал № 1. КМП входит в состав вакуумного канала как его первый элемент. Основой КМП является цилиндр из нержавеющей стали, сваренный из трех труб разного диаметра, на который плотно намотан тонкий провод из мягкого отожженного железа. Входной и выходной диаметры КМП составляют 1.5 и 2.5 см соответственно. Длина устройства 110 см.

Параметры пучка

При энергии электронов $E_0 = 350$ МэВ размер пучка на выходном окне ускорителя составляет 7–10 мм как по горизонтали, так и по вертикали при интенсивности выведенного пучка $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. В тестовой зоне зала №1 пучок фокусируется линзой Л4 МОК на фронтальную плоскость исследуемого детектора в круглое пятно диаметром ~ 10 мм. Интенсивность пучка на выходе ускорителя определяется настройкой параметров ускорителя и системы медленного вывода. Уменьшение интенсивности в процессе транспортировки пучка определяется его "растаскиванием" рассеянным полем магнита ускорителя в промежутке между выходным окном и КМП, многократным рассеянием на воздухе в этом же промежутке и рассеянием на остаточном газе в продолжительном (до 25 м) канале транспортировки. Эти факторы в сочетании с высокой селективностью МОК уменьшают интенсивности в тестовой зоне до $5 \cdot 10^9 - 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, при транспортировке теряется не менее половины порядка от начальной интенсивности. Но и эту интенсивность масштаба $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ приходится снижать установкой коллиматоров с отверстиями $\varnothing 2-5$ мм на тракте вывода перед линзой Л2 (перед поворотным магнитом СП-3), причем снижать до уровня 10^3-10^6 с^{-1} , удобного для целей тестирования и калибровок детекторов. Диапазон энергий выводимых электронов составляет $E_e = 200-500$ МэВ при разбросе энергий $\delta_e \sim 1\%$.

3. ТЕСТОВАЯ ЗОНА ЗАЛА № 2

В зале № 2 оборудована тестовая зона γ_1 , реализованная на базе спектрометрического магнита

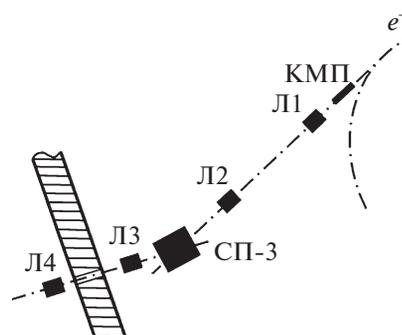


Рис. 2. Схема канала медленного вывода ускорителя С-25Р. КМП — компенсатор краевого магнитного поля; Л1–Л4 — квадрупольные линзы магнитооптического канала; СП-3 — поворотный магнит.

СП-57. Она включает: а) 40-метровый канал транспортировки пучка тормозных гамма-квантов с максимальной энергией 300–500 МэВ, сгенерированных при взаимодействиях краев банчей ускоренных электронов с внутренней вольфрамовой мишенью толщиной $0.22X_0$ в вакуумной камере синхротрона (X_0 — радиационная длина) [2], и б) пучок вторичных электронов (или позитронов) с диапазоном энергий $E_e = 30-300$ МэВ при энергетическом разрешении $\delta = \Delta E_e / E_e = 14-2\%$, соответственно (рис. 3) [3, 4]. Интенсивность вторичного пучка электронов (позитронов) при коллиматоре C_3 в свинцовой защите $\varnothing 30$ мм составляет около 10^2 с^{-1} .

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ (ПОЗИТРОНОВ)

Перед окончательным монтажом тестового канала γ_1 ускорителя "Пахра" было проведено моделирование характеристик вторичного пучка позитронов, формируемого системой "фотонный пучок—конвертер—магнит—коллиматор". Численные расчеты проводились на базе пакета GEANT4 версии 10.0 с включением моделей основных физических процессов, соответствующих одному из стандартных наборов — Physics List QGSP_BERT. Главная цель моделирования состояла в определении оптимальной геометрии установки и в оценке ожидаемого энергетического разброса частиц во вторичном пучке с учетом конечного размера исходного фотонного пучка, конвертера, коллиматора, краевого магнитного поля, рассеяния в конвертере и в воздухе.

На рис. 4а приведено в проекции на медианную плоскость магнита СП-57 распределение потока позитронов. Результаты получены для медленного конвертера $0.5 \times 5 \times 0.1 \text{ см}^3$ (2), расположен-

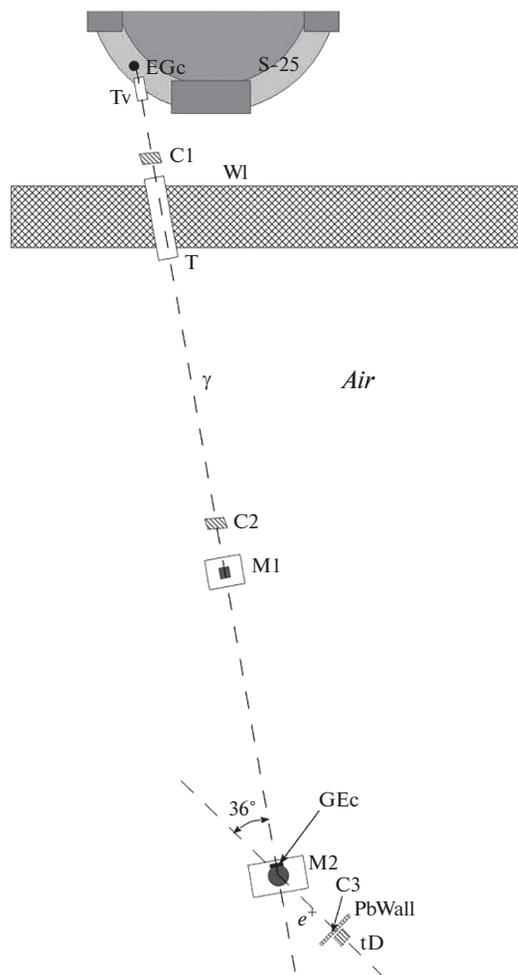


Рис. 3. Схема тестового канала γ_1 ускорителя “Пахра”: EGc – внутренняя вольфрамовая мишень; Tv – вакуумный вывод с алюминиевым окошком толщиной 0.2 мм; C1 – первый коллиimator канала γ_1 с выходным диаметром 13 мм; Wl – железобетонная стена ускорительного зала толщина ~3 м; T – выход канала γ_1 в зал № 2 (стальная труба диаметром ~16 см); C2 – второй коллиimator канала типа “скрайбер” (выходной диаметр 3 см); M1 – очищающий магнит СП-03; GEc – медный конвертер $0.5 \times 5 \times 0.1$ см на срезе полюсов магнита M2; M2 – спектрометрический магнит СП-57 (центр магнита расположен на расстоянии ~40 м от внутренней мишени канала γ_1); C3 – коллиimator левого плеча тестового канала (\varnothing 3–30 мм); PbWall – защитная свинцовая стенка левого плеча тестового канала (толщина 10 см, диаметр коллииматора в стенке 3–30 мм); tD – место расположения исследуемого детектора.

ного на срезе полюсов магнита (3) на траектории фотонного пучка, проходящего на рисунке снизу вверх. Величина индукции магнитного поля в центре межполюсного зазора шириной 6 см составляла 0.75 Тл, начало спада поля находилось в 6 см от среза внутрь, постоянная спада поля 6.7 см. Осевая линия коллииматора левой (5) защитной свинцовой стенки размера $150 \times 150 \times 10$ см³ со-

ставляла угол 36° с осью первичного фотонного пучка. Расчет проводился с введением технической цилиндрической области \varnothing 600 см и высотой 30 см ((7) на рис. 4а), за пределами которой (исключая область коллииматора) частицы не прослеживались (попадали в “черную дыру”).

На рис. 4б показан результат численного моделирования зависимости от энергии позитронов угла их вылета θ и интенсивности позитронного пучка от индукции магнитного поля в центре магнита $B_{\max} = 0.1, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75$ Тл. Рисунок показывает, что при указанных выше параметрах коллииматора через него проходят позитроны с энергиями до ~300 МэВ. Интенсивность пучка позитронов с энергиями, лежащими в диапазоне от ~50 до ~130 МэВ, оказывается максимальной, что в дальнейшем было подтверждено прямыми измерениями.

С помощью GEANT4 было также выполнено моделирование прохождения позитронов от точки рождения в медном конвертере толщиной 1 мм через \varnothing 10 мм коллиimator до места расположения исследуемых детекторов при полях в магните в широком диапазоне величин B_{\max} (рис. 5). Рассчитанная зависимость величины энергии позитронов, прошедших коллиimator, и экспериментально измеренная зависимость той же энергии совпали в пределах ~3% [4], что указывает на достоверность используемой в расчетах приближенной карты магнитного поля.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены характеристики тестовых γ и e^\pm пучков ускорительного комплекса ФИАН “Пахра”. Пучки предназначены для проведения калибровок детекторов, применяемых в крупных современных ускорительных и астрофизических экспериментах.

Канал медленного вывода электронов в зал № 1 дает электронный пучок с: максимальной интенсивностью до $\sim 10^{10}$ с⁻¹. Применение дополнительной коллимации на магнитооптическом тракте позволяет снизить интенсивность пучка до более удобного уровня 10^3 – 10^6 с⁻¹. При этом диапазон энергий электронов, выводимых из ускорителя, составляет 250–500 МэВ при энергетическом разрешении электронного пучка $\delta \sim 1\%$.

Низкоинтенсивный квазимонохроматический пучок вторичных электронов (позитронов) в зале № 2 имеет следующие основные характеристики: диапазон энергий электронов (позитронов) от 30 до 300 МэВ при соответствующем энергетическом разбросе $\delta = \Delta E/E = 14$ –2%. Интенсивность вторичного пучка электронов (позитронов) в слу-

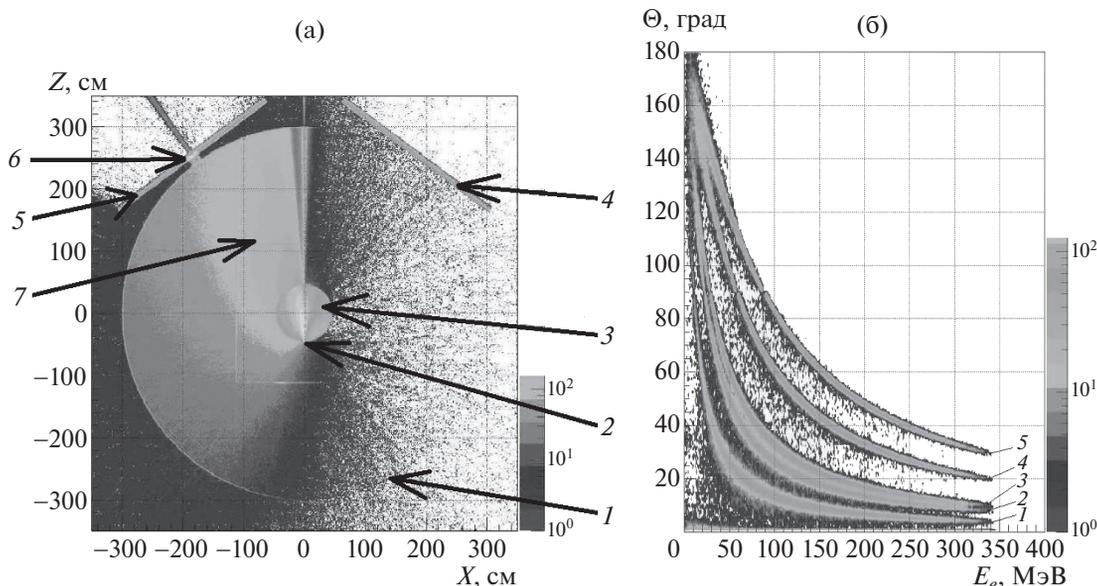


Рис. 4. Результаты моделирования с помощью GEANT4 генерации вторичного пучка позитронов на конвертере магнита СП-57. (а) Вид сверху на медианную плоскость магнита: 1 – технический цилиндр, вне которого частицы не прослеживаются; 2 – конвертер, устанавливаемый на краю полюса магнита (маленького круга в центре); 3 – полюс магнита СП-57; 4, 5 – правая и левая свинцовые защитные стенки; 6 – коллиматор и поток отобранных частиц; 7 (светлая область) – основной поток позитронов. (б) Угол вылета позитрона Θ в зависимости от энергии рожденной частицы E_e при нескольких значениях индукции в центре магнита B_{\max} : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.25, 4 – 0.5, 5 – 0.75 Тл.

чае использования $\varnothing 30$ мм коллиматора в свинцовой защите составляет около 10^2 с^{-1} .

Моделирование генерации вторичного позитронного пучка тормозным фотонным пучком по-

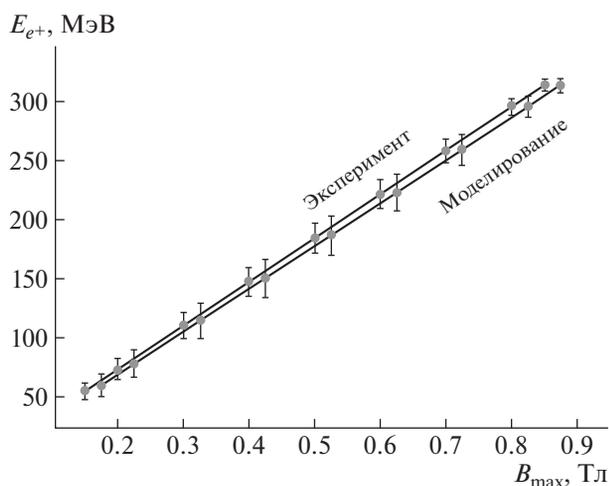


Рис. 5. Результаты моделирования с помощью GEANT4 энергии пучка позитронов, а также средней энергии позитронов, определенной экспериментально, в зависимости от максимального значения поля магнита СП-57.

казало, что в диапазоне значений индукции магнитного поля 0.1–0.75 Тл в центре магнита в $\varnothing 30$ мм коллиматор, расположенный в свинцовой защите под углом 36° относительно траектории фотонного пучка, проходят позитроны с энергией до ~ 300 МэВ. Определено, что максимум интенсивности позитронов лежит в диапазоне энергий ~ 50 –130 МэВ, что в дальнейшем было подтверждено прямыми измерениями. Рассчитанная зависимость величины энергии позитронов, прошедших коллиматор, совпала с экспериментальной зависимостью в пределах $\sim 3\%$, что подтвердило надежность моделирования.

В дальнейшем моделирование предполагается продолжить и изучить в частности вопрос о целесообразности установки гелиевых мешков для устранения рассеяния частиц в воздухе и уменьшения их энергетического разброса после прохождения коллиматора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантами РФФИ-NICA № 18-02-40061 и № 18-02-40079 и доложена на конференции МКТЭФ (ноябрь 2019 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Башмаков Ю.А., Карпов В.А., Яров А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 5. С. 905–911.
2. Бессонов Е.Г., Малиновский Е.И., Субботин Г.Г. // Препринт ФИАН № 28. 2006. Москва: ФИАН.
3. Карпов В.А., Серов А.В. // Краткие сообщения по физике. 2007. № 9. С. 15–20.
4. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2019. №2. С. 5–11.

Test Beams of the LPI Accelerator Complex “Pakhra”

**V. I. Alekseev¹, V. A. Baskov¹, V. A. Dronov¹, A. I. L’vov¹, I. A. Mamonov¹, *,
V. V. Polyanskiy¹, and S. S. Sidorin¹**

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI), Moscow, 119333 Russia*

**e-mail: ilyha.mamonov@gmail.com*

Received May 8, 2020; revised August 3, 2020; accepted August 3, 2020

Abstract—In this paper, we report the characteristics of the generated beams, the extracted electron beam and the beam of secondary electrons/positrons, of the LPI accelerator complex Pakhra as of November 2019 for testing and calibrating detectors used in large accelerator and astrophysical experiments. At energies of 250–500 MeV of the electron beam ejected into Hall 1 from the S-25R synchrotron, its energy resolution is $\delta \sim 1\%$ and the intensity can be changed by collimators in the range of 10^3 – 10^{10} s^{-1} . The quasi-monochromatic beam of secondary electrons produced in Hall 2 typically has an energy in the range of 50–300 MeV, a corresponding energy resolution of $\delta = 14$ – 2% , and an intensity of $\sim 10^2 \text{ s}^{-1}$. The performed simulation of the characteristics of the secondary positron beam allowed selecting the optimal geometry of the setup and showed good agreement with the experimental data obtained later.

Keywords: electron synchrotron, test beams, extracted electron beam, secondary electron beam, energy resolution, intensity, simulations