

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.384.663

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ИМПУЛЬСОВ 2–13 ГэВ/с НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

© 2026 г. С. Ф. Решетников^{а, *}, Е. В. Барнов^а, А. Н. Васильев^{а, б},
В. А. Маишеев^а, В. В. Моисеев^а, В. В. Мочалов^{а, б}, Ю. А. Чесноков^а

^аНИИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: Sergey.Reshetnikov@ihep.ru

Поступила в редакцию 19.09.2025 г.

После доработки 23.09.2025 г.

Принята к публикации 23.09.2025 г.

Реализован способ получения пучка заряженных адронов в диапазоне импульсов 2–13 ГэВ/с на установке “СПАСЧАРМ” ускорительного комплекса У-70 для проведения методических исследований. Продемонстрирована схема получения такого пучка при использовании кристаллического дефлектора, размещенного в вакуумной камере ускорителя с жесткой фокусировкой У-70, для вывода первичных протонов на внешнюю алюминиевую мишень. Показано, что данный метод позволяет получить пучки заряженных частиц в указанном диапазоне импульсов для проведения методических исследований.

Ключевые слова: ускорительная техника, системы вывода, заряженные адроны

DOI: 10.56304/S2079562926020053

ВВЕДЕНИЕ

На синхротроне У-70 в ИФВЭ создан целый комплекс каналов вторичных частиц [1], которые обеспечивают проведение широкой программы физических исследований. Часть экспериментальных установок работают с использованием медленного вывода первичного протонного пучка, несколько установок с использованием внутренних мишеней, либо кристаллических дефлекторов, в частности, установка “СПАСЧАРМ” (СПиновые АСимметрии в образовании ЧАРМония) [2, 3] использует внутренние мишени и кристаллические дефлекторы в 24 и 25 магнитных блоках У-70.

Экспериментальная установка “СПАСЧАРМ” была создана для изучения спиновых явлений в инклюзивном рождении большого числа элементарных частиц и резонансов в адрон-адронных столкновениях на ускорительном комплексе У-70 в Протвино. Основной целью эксперимента является систематическое изучение спиновых эффектов во взаимодействиях адронов. В настоящее время установка “СПАСЧАРМ” расположена на канале № 14 ускорительного комплекса У-70. В зону установки можно вывести несколько типов пучков для экспериментальной установки. Основным из них является пучок адронов с отрицательным электрическим зарядом, который включает более

98% π^- -мезонов, $\sim 1.5\%$ K^- мезонов, и $\sim 0.2\%$ антипротонов. Этот пучок генерируется на внутренней мишени ускорителя, установленной в 24 промежуточной вакуумной камере ускорителя вблизи равновесной орбиты циркулирующего протонного пучка. Поскольку траектория частиц, выходящих из внутренней мишени ускорителя, определяется локальными магнитными полями ускорителя, то в существующей геометрии расположения элементов канала можно инжектировать в магнитооптический канал только пучки отрицательно заряженных вторичных частиц с импульсами больше 25 ГэВ/с (при энергии ускоренного протонного пучка 50 ГэВ)¹.

Кроме того, используя специальную мишень в блоке 24 ускорителя, установленную на расстоянии 40 мм (в “+” от центра ускорителя) от равновесной орбиты, можно получать пучки электронов с импульсами 18–32 ГэВ/с. При наведении на указанную мишень протонного пучка образуется достаточно интенсивный поток гамма-квантов (от распадов π^0 -мезонов), который попадает на свинцовый конвертер, установленный на расстоянии 6.5 м от мишени на координате 120 мм наружу от орбиты. Рожденные в конвертере электро-

¹ Данное ограничение линейно зависит от энергии протонов, ускоренных в кольце У-70.

ны направляются магнитным полем ускорителя в направлении 14 канала.

С конца 80-х гг. прошлого века появилась возможность работы на первичном протонном пучке интенсивностью 10^6 – 10^7 в цикле, выводимом в канал изогнутым на угол 80 мрад монокристаллом кремния, который был установлен в вакуумную камеру в 25-ом блоке ускорителя с жесткой фокусировкой У-70 [4, 5].

Указанные режимы работы обеспечивают необходимый пучок для набора физических данных. Однако для развития экспериментальной установки и, соответственно, для методических измерений важно иметь пучки частиц с относительно низкими (2–13 ГэВ/с) импульсами, в том числе и положительно заряженные. Такие пучки нужны, прежде всего, для исследования детекторов идентификации частиц. В рамках развития экспериментальной установки СПАСЧАРМ [6] и проведения в будущем исследований на пучке поляризованных протонов и антипротонов [7] необходимо разработать и создать детектор колец черенковского излучения. Наиболее подходящим является детектор типа FARICH [8], который, как планируется, позволит проводить разделение π и К-мезонов до импульсов 7–9 ГэВ/с. Для работы с этим детектором необходимо иметь пучок частиц с импульсами в указанном диапазоне.

В данной работе представлен механизм получения такого пучка и результаты эксперимента, проведенного в первом сеансе 2025 г. на У-70, по изучению возможности вывода пучка вторичных положительно заряженных “мягких” адронов в канал транспортировки № 14 и далее на установку “СПАСЧАРМ”.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПУЧКОВ АДРОНОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА “СПАСЧАРМ”

Как было отмечено выше, в существующей геометрии расположения оси канала частиц № 14 относительно внутренних мишеней ускорителя получить адронные пучки низкой энергии с их помощью невозможно. Одним из способов выведения пучков большой интенсивности является медленный вывод, который на ускорительном комплексе У-70 используется для вывода на несколько экспериментальных установок. Однако, в случае 14 канала такой вывод невозможен, так как при использовании медленного вывода угол поворота частиц в септум магните значительно меньше требуемого, практически по касательной к орбите пучка. Кроме того, схема медленного вывода в канал № 14 предполагает помимо прочего оборудования (секступоли, станция перегруппировки пучка либо квадруполь, “бамп-магни-

ты”, электростатический дефлектор) использование и изготовление трех новых септум магнитов и квадруполь предварительной фокусировки, которые необходимо разместить в прямолинейных промежутках. В текущей конфигурации расположения оборудования на ускорительном комплексе У-70 свободных прямолинейных промежутков нет.

В этих условиях с учетом уже реализованного вывода в канал № 14 интенсивного протонного пучка с помощью кристаллических дефлекторов², был предложен метод получения вторичных пучков, генерируемых на дополнительной мишени, установленной в головной части канала с использованием этого режима вывода [4, 5]. При наведении до $\sim 7 \cdot 10^{11}$ протонов на кристаллический дефлектор, установленный в блоке 25 ускорителя, можно получить на мишени на входе в канал № 14 выведенный пучок протонов с интенсивностью до $\sim 10^8$ протонов в цикле. На рис. 1 показана принципиальная схема получения “низкоэнергетичного” адронного пучка для эксперимента “СПАСЧАРМ”.

Выведенный изогнутым кристаллом (bent crystal) из ускорителя 50 ГэВ/с протонный пучок попадает на алюминиевую мишень (target), установленную перед первым объективом квадрупольных линз (Q1, Q2). Далее сгенерированный в мишени вторичный адронный пучок захватывается в канал и транспортируется на мишень экспериментальной установки. Транспортировка этого пучка производится существующими квадрупольными линзами и двумя поворотными магнитами и не требует дополнительного оборудования.

Перед проведением эксперимента были выполнены расчеты режимов и сделаны оценки ожидаемых интенсивностей пучка “низкоэнергетичных” адронов (рис. 2).

Расчеты были выполнены на основе полуэмпирической формулы из статьи [9] и в предположении взаимодействия пучка протонов с импульсом 50 ГэВ/с и интенсивностью 10^7 за цикл с алюминиевой мишенью длиной 30 см. Угловой аксептанс канала в расчетах предполагался равным 30 мкр., а импульсный разброс получаемого пучка $\pm 5\%$. Видно, что при сбросе на мишень 10^7 – 10^8 протонов можно ожидать интенсивность вторичного пучка от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч частиц.

Для транспортировки вторичного адронного пучка была разработана на основе существующего оборудования канала 14 оптическая схема, представленная на рис. 3. Пучок адронов низкой энергии из мишени с помощью магнитов М1 и М2 транспортируется к мишени эксперимента “СПАСЧАРМ”, а с помощью квадрупольных линз Q1–Q8 производится фокусировка пучка.

² По существу, это тоже медленный вывод.

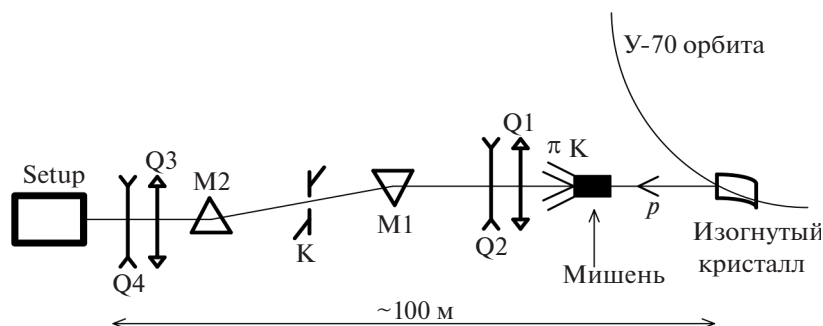


Рис. 1. Принципиальная схема получения вторичного пучка отрицательных частиц. Q1–Q4 квадрупольные линзы, M1 и M2 поворотные магниты, K – коллиматор.

Головной объектив состоит из 4-х линз: двух длинных (2 м) линз Q2, Q4 и двух коротких (1 м) линз (Q1, Q3). Для получения пучков с импульсами менее 11 ГэВ/с, согласно расчетам, достаточно использовать две линзы Q3, Q4. Для импульсов больше 11 ГэВ/с необходимо дополнительно использовать линзу Q2. Это объясняется небольшим расстоянием от центра мишени до центра линзы Q3 равному 3.9 м, что требует больших полей и ограничивает импульс пучка. Увеличить указанное расстояние практически невозможно, так как мишень при увеличении расстояния попадает в область больших рассеянных полей ускорителя. Головной объектив фокусирует пучок в коллиматор K3 по обеим плоскостям. В целом система головных линз, магнит M1 и коллиматор K3 задают импульсный разброс пучка. Затем элементы канала (магнит M2 и линзы Q5, Q6) направляют и фокусируют пучок на мишень эксперимента. Квадруполь Q7, Q8 не предполагается использовать в данном случае.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВЫВОДУ ПУЧКА

Схема получения пучка “мягких” заряженных адронов, показанная на рис. 1, предполагает вывод в направлении канала транспортировки №14 первичного протонного пучка с импульсом 50 ГэВ/с изогнутым кристаллом на установленную внешнюю мишень.

Таким образом, важная роль отводится наведению протонного пучка с импульсом 50 ГэВ/с повышенной интенсивности до 10^7 – 10^8 протонов в цикле на внешнюю алюминиевую мишень (длина мишени 30 см), установленную на входе в канал транспортировки № 14. Вывод циркулирующего в У-70 пучка был осуществлен новым кристаллическим дефлектором, размещенном в унифицированной станции СКД25 [10] (рис. 4), угол отклонения этого дефлектора – 80 мрад.

Положительный результат предполагалось достичь за счет оптимизации размеров кристалла.

Эффективность вывода при повороте пучка в кристалле определяется формулой

$$\text{Eff} \sim (\theta_c/\varphi)\exp(-L/L_d) \text{ (см. [11])},$$

где характерный параметр L_d , называемый длиной деканализации, составляет ~20 мм для энергии 50 ГэВ, что на 40% меньше, чем использовалось для вывода протонов с энергией 70 ГэВ. В соответствии с этим фактором новый кристалл был укорочен, по сравнению со старыми дефлекторами, применявшимися ранее для 70 ГэВ [4]. Другим важным фактором для успешного проведения эксперимента стало создание новой станции кристаллических дефлекторов СКД25 [10, рис. 2], которая обеспечивает высокую прецизионность ориентации кристалла по направлению пучка (с точностью 10 мкрад) и оснащена автоматизированной системой управления [12].

В начале эксперимента по организации вывода канал № 14 был настроен на импульс первичного пучка 50 ГэВ/с для вывода пучка протонов, а внешняя мишень была выведена из пучка. В этих

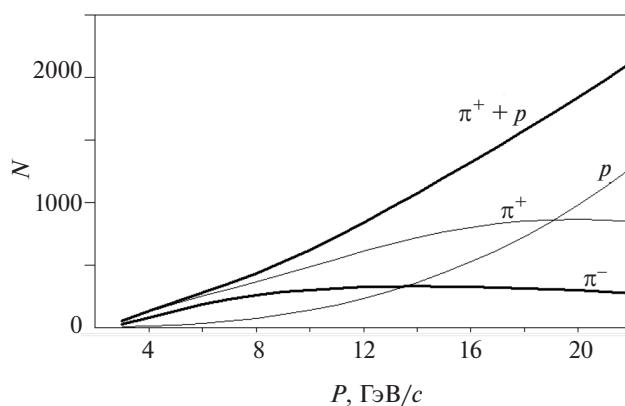


Рис. 2. Рассчитанные интенсивности адронов генерируемых в алюминиевой мишени при наведении на нее 10^7 протонов. Сорт частиц указан на рисунке, другие детали расчета в тексте.

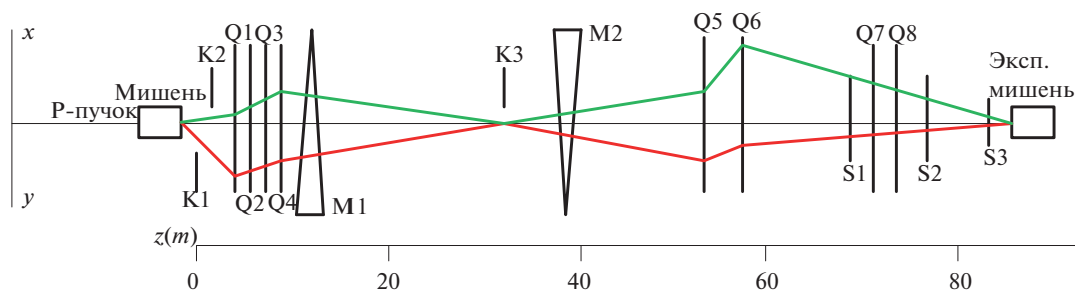


Рис. 3. Оптическая схема пучка адронов низкой энергии. Q1–Q8 квадрупольные линзы, M1 и M2 магниты, K1–K3 коллиматоры, S1–S3 сцинтилляционные счетчики, X и Y горизонтальная и вертикальная координаты. На схеме зеленым и красным цветом показаны синусные траектории для двух плоскостей (горизонтальной и вертикальной) — траектории частиц, имеющих нулевую координату и угол наклона к оси, соответствующий аксептансу канала.

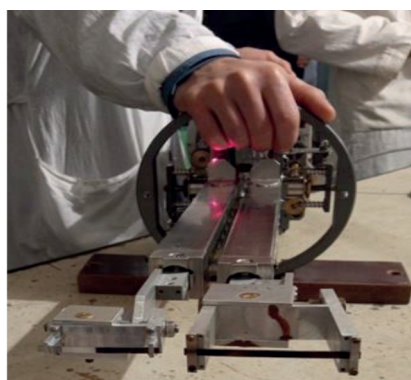


Рис. 4. СКД25 с установленными кристаллическими дефлекторами (новый кристалл показан слева).

условиях при оптимальной ориентации кристалла и сбрасываемой интенсивности на кристалл 10^{10} прот./цикл, на установке “СПАСЧАРМ” с помощью сцинтилляционных счетчиков была зафиксирована интенсивность $3 \cdot 10^6$ прот./цикл. Затем с помощью монитора обратной связи наводимая на кристалл интенсивность была увеличена до 10^{11} прот./цикл. Интенсивность пучка контролировалась с помощью осциллографа (рис. 5) с точностью 10%, а также по показаниям интегральных мониторов светимости.

Увеличенную интенсивность уже не регистрировали счетчики экспериментальной установки³, но эффективность вывода пучка сохранялась. Таким образом, интенсивность протонного пучка, выводимого в канал № 14, составила порядка $3 \cdot 10^7$ прот./цикл. Это подтверждается также увеличением светимости калиброванного люминофорного экрана (рис. 6).

³ Длительность вывода при проведении исследований ограничивалось временем 400–600 мсек, что превышает возможности регистрации.

После предварительных операций и подтверждения наведения протонного пучка, была введена внешняя алюминиевая мишень, канал № 14 был перестроен на импульс вторичных частиц в диапазоне 2–13 ГэВ/с. Во время проведения исследования, для быстрого подтверждения наличия пучка нужной энергии, контролировалось попадание пучка в дрейфовые камеры экспериментальной установки (рис. 7). Для этой цели первоначально было проверено, что пучок не попадает в “мертвую” зону трековых детекторов, чтобы иметь возможность восстановить импульс пучка.

На рис. 7 сверху показано положение “прямого” пучка, то есть без поля в спектрометрическом магните. Среднее положение пучка в дрейфовой камере было ~ 41.7 отсчета (один отсчет соответствует 3 см). После включения спектрометрического магнита, координата центра пучка стала примерно ~ 37.2 отсчета (см. рис. 7 посередине), что соответствует импульсу около 10 ГэВ/с. После выставления режима канала, примерно соответствующему расчетному импульсу 5 ГэВ/с, среднее положение пучка стало ~ 32.4 (рис. 7, снизу), что соответствует импульсу около 5 ГэВ/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После проведения геометрической привязки детекторов для двух режимов магнитных элементов канала № 14 получены импульсные спектры пучка с использованием трековой системы установки (рис. 8). В первом режиме реально измеренное среднее значение импульса основного пучка 9.91 ± 0.01 ГэВ/с, импульсный разброс $13 \pm 1\%$, во втором режиме среднее значение импульса 4.85 ± 0.01 ГэВ/с, импульсный разброс $12 \pm 1\%$. При сбросе на кристалл 10^{11} прот./цикл интенсивность пучка на мишени была порядка $3 \cdot 10^7$ прот./цикл. В этих условиях интенсивность пучка вторичных частиц в канале, по измерениям установки “СПАСЧАРМ”, составляла в среднем около

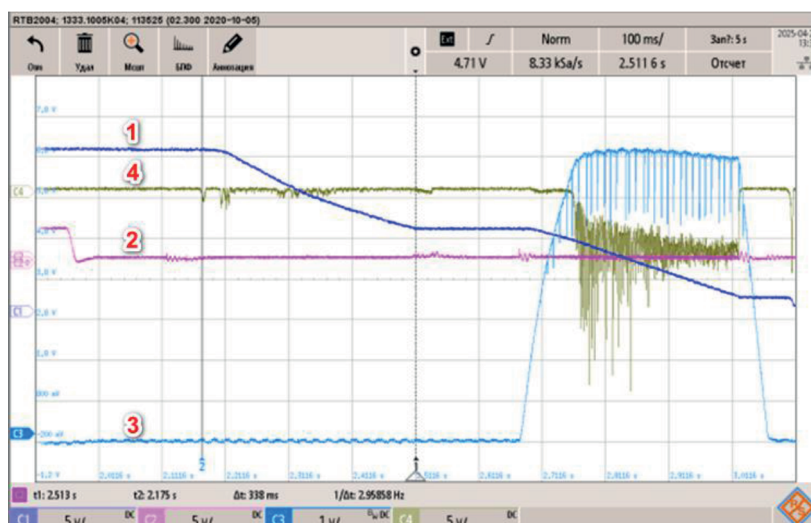


Рис. 5. Режим работы СКД25 при выводе протонов в направлении канала № 14: 1 — интенсивность У-70, 2 — цикл У-70, 3 — ток бампа наведения пучка на кристалл 20/26, 4 — сигнал монитора обратной связи в 25 промежутке У-70.

~2500 частиц для режима “10 ГэВ” и около ~1800 частиц для режима “5 ГэВ”, при этом в заданный диапазон импульсов попадает около 60% событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод получения “мягких” адронов показал успешный результат при его апробации в ходе экспериментальных исследований в первом сеансе 2025 г. на ускорительном комплексе У-70. Продемонстрировано, что данный метод позволяет получить пучок адронов в диапазоне импульсов от 2 до 13 ГэВ/с и интенсивностью несколько тысяч частиц, что удовлетворяет требо-

ваниям для проведения методических исследований. Расположенные на канале № 14 пороговые черенковские счетчики позволяют проводить “мечение” π -мезонов и служат дополнительным критерием отбора для проведения исследований по идентификации частиц. Трековый спектрометр установки позволяет измерять импульс пучковых частиц, что также необходимо для изучения характеристик исследуемых приборов. Отметим, что был получен пучок положительно заряженных адронов, что ранее было невозможно на канале № 14.

В дальнейшем этот метод может использоваться для устойчивой работы при проведении методических исследований на экспериментальной установке “СПАСЧАРМ”.

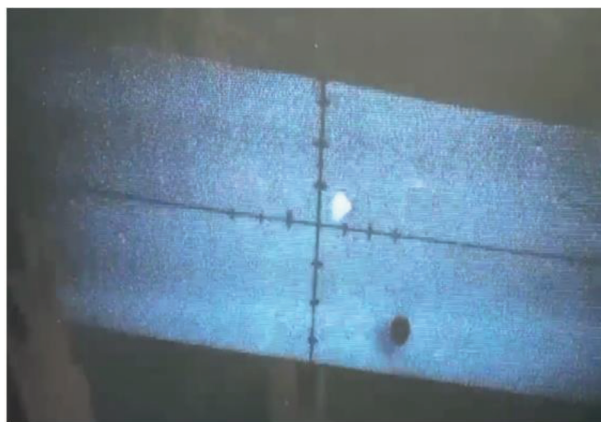


Рис. 6. Изображение на экране пучка протонов, выведенного с помощью нового кристалла с СКД25.

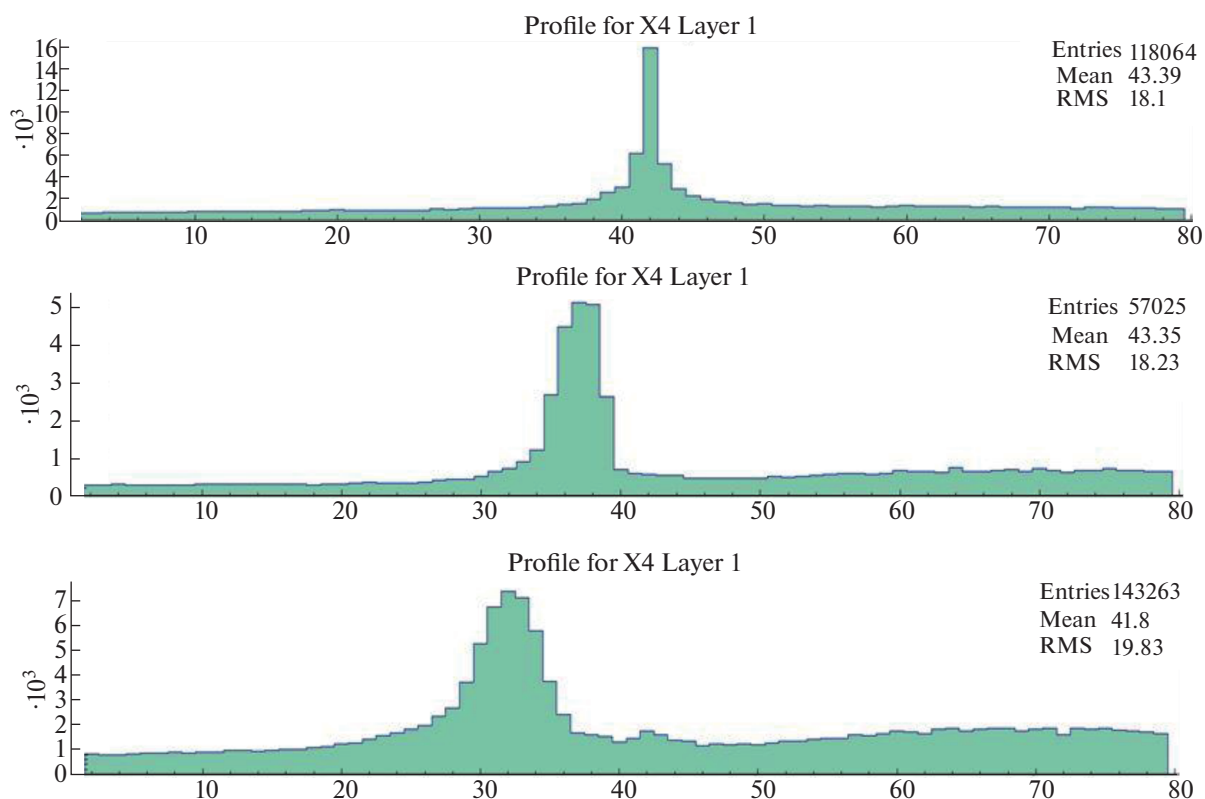


Рис. 7. Профиль пучка “мягких” пионов на камере ДК4 установки “СПАСЧАРМ” при выключенном спектрометрическом магните (сверху), в режиме “10 ГэВ” (в центре) и в режиме “5 ГэВ” (снизу). По оси абсцисс — номер дрейфовой трубки первого слоя камеры X последней станции трековой системы.

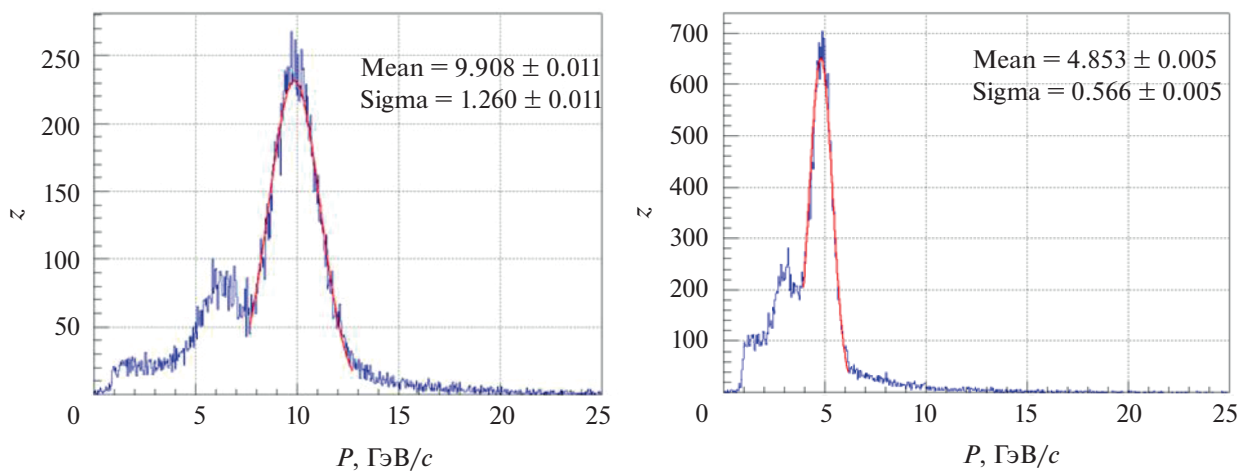


Рис. 8. Импульсные спектры пучка для двух режимов магнитных элементов канала № 14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Адо Ю.М. и др. Развитие каналов частиц на ускорителе ИФВЭ. Препринт 85-182. 1985. Серпухов: ИФВЭ
2. Semenov P.A. Detectors of the SPASCHARM Experiment at U-70 Accelerator // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 86 (5). P. 817.
3. Абрамов В.В., Алексеев Г.Д., Алексеев И.Г. и др. Экспериментальная установка СПА-СЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70 // Приб. техн. эксперим. 2024. № 6. С. 4–21.
4. Asseev A.A., Bavizhev M.D., Ludmirsky E.A., Maishev V.A., Fedotov Yu. S. // Extraction of the 70-GeV

- proton beam from the IHEP accelerator towards beam-line 2(14) with a bent single crystal // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A. 1991. V. 309 (1–2). P. 1–4.
5. Решетников С.Ф. и др. Вывод пучка протонов варьируемой интенсивности из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов // Ядерн. физ. инжир. 2025. Т. 16 (1). С. 80–86 [Reshetnikov S.F. et al. Extraction of a Proton Beam of Variable Intensity from the U-70 Accelerator Using Bent Crystals // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. P. 1455–1461].
 6. Abramov V.V. et al. Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54 (1). P. 69.
 7. Abramov V.V. et al. The polarized proton and antiproton beam project at U-70 accelerator // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2018. V. 901. P. 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.05.050>
 8. Barnyakov A. Yu. et al. R&D status of FARICH option for PID // Int. J. Mod. Phys. A. 2024. V. 39 (26n27). P. 2442012. <https://doi.org/10.1142/S0217751X24420053>
 9. Bellucci S., Chesnokov Y.A., Maisheev V.A., Yazygin I.A. Volume reflection and volume capture of ultra relativistic particles in bent single crystals // Phys. Rev. Accel. Beams. 2015. V. 18. P. 114701.
 10. Решетников С.Ф. и др. Унифицированная станция кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 // Ядерн. физ. инжир. 2025. Т. 16 (6). С. 873–880.
 11. Biryukov V.M. et al. Crystal Channeling and its Application at High-Energy Accelerator. 2013. Berlin: Springer.
 12. Афонин А.Г. и др. Развитие аппаратно-программных средств системы медленного вывода с использованием кристаллических дефлекторов на синхротроне У-70. Препринт 2017–3. 2017. Протвино: ИФВЭ.

Production of a Charged Hadron Beam in the Momentum Range of 2–13 GeV/c at the U-70 Accelerator

S. F. Reshetnikov^{1, *}, E. V. Barnov¹, A. N. Vasiliev^{1, 2}, V. A. Maisheev¹, V. V. Moiseev¹,
V. V. Mochalov^{1, 2}, and Yu. A. Chesnokov¹

¹NRC “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: Sergey.Reshetnikov@ihep.ru

Received September 19, 2025; revised September 23, 2025; accepted September 23, 2025

Abstract—A method for obtaining a beam of charged hadrons in the momentum range of 2–13 GeV/c has been implemented at the “SPASCHARM” facility of the U-70 accelerator complex for methodological studies. A scheme for obtaining such a beam has been demonstrated using a crystal deflector placed in the vacuum chamber of the U-70 strong focusing accelerator to extract primary protons onto an external aluminum target. It has been shown that this method allows for obtaining beams of charged particles in the specified momentum range for methodological studies.

Keywords: accelerator technology, beam extraction systems, charged hadrons