

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.384.663

УНИФИЦИРОВАННАЯ СТАНЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

© 2025 г. С. Ф. Решетников^{а, *}, А. Г. Афонин^а, Е. В. Барнов^а, А. Я. Левин^а,
В. В. Мочалов^{а, b}, М. Н. Уханов^а, Ю. А. Чесноков^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Протвино, 142281 Россия

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

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

Поступила в редакцию 09.07.2025 г.

После доработки 29.07.2025 г.

Принята к публикации 01.08.2025 г.

Представлены результаты разработки, создания и использования унифицированной станции кристаллических deflectоров (СКД), обеспечивающей вывод протонного пучка непосредственно из вакуумной камеры ускорителя У-70. Данная станция применяется для вывода протонного пучка с помощью эффекта каналирования заряженных частиц в кристаллах. Станция осуществляет тонкие угловые и линейные перемещения кристаллических deflectоров, находясь в жестких условиях работы: в циклическом переменном магнитном поле ускорителя, в условиях высокого вакуума, при высокой мощности дозы радиации. Подробно описаны составные части унифицированной СКД и их взаимная связь. Представлен комплекс автоматизированного управления унифицированной СКД. Показаны преимущества унифицированной СКД, относительно станций предыдущего поколения. Приводятся результаты применения унифицированной СКД при выводе пучка протонов на несколько экспериментальных установок в сеансах работы ускорительного комплекса У-70.

Ключевые слова: ускорительная техника, системы вывода, кристаллический deflectор, станция кристаллических deflectоров

DOI: 10.56304/S2079562925060223

ВВЕДЕНИЕ

Одним из востребованных режимов вывода пучка из ускорителя У-70 является вывод с применением кристаллических deflectоров. Этот режим вывода является важным дополнением к режимам быстрого вывода, медленного вывода и вывода с использованием внутренних мишеней, расширяя возможности по обеспечению потребителей пучками заряженных частиц в регулярных сеансах на У-70. Данный способ позволяет вывести из вакуумной камеры ускорителя непосредственно пучок протонов с энергией ускорителя, в широком диапазоне по интенсивности и углу вывода, без использования специальных магнитных систем, таких как, например, септум-магниты. При этом интенсивность (эффективность) вывода зависит от угла изгиба deflectора.

Такой способ вывода пучка был предложен Е. Цыгановым [1], а впервые был реализован в 1989 г. на ускорителе ИФВЭ с использованием кристаллического deflectора, изогнутого на большой угол ~ 85 мрад. Эффективность этого вывода не превышает 10^{-3} [2]. Несмотря на низкую эффективность вывода, интенсивность пучка, выведенного

таким кристаллическим deflectором, на 1–2 порядка превышает интенсивность пучка заряженных частиц, выведенных с использованием внутренней мишени. Исследования пучка, полученного таким способом вывода показало, что количество фоновых (не протонов) частиц в нем не превышает 0.026%, а импульсный разброс не хуже 0.13% [3]. Создание такого пучка позволило получить в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ результаты по измерению односпиновой асимметрии при энергии 50–70 ГэВ [4–6]. В настоящее время планируется новый цикл измерений по асимметрии на новой экспериментальной установке СПАСЧАРМ [7], для чего подготовлены новые кристаллические deflectоры с учетом изменения режима работы ускорительного комплекса.

В 1997 г. начались работы по высокоэффективному выводу с использованием коротких кристаллов длиной (1–2) мм изогнутых на малые $\sim (1–2)$ мрад углы. С использованием такого подхода была получена эффективность вывода до 85% [8, 9]. Созданный в ИФВЭ вывод с использованием коротких кристаллов существенно рас-

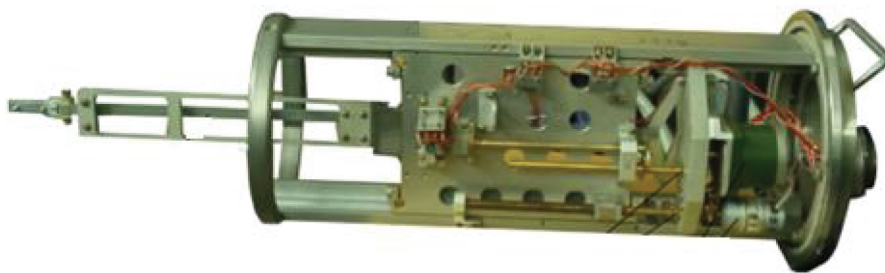


Рис. 1. Станция кристаллических дефлекторов с одной кареткой.

ширил возможности проведения экспериментов на пучках высоких энергий.

Система вывода пучка с использованием кристаллических дефлекторов функционально включает в себя, так называемую, станцию кристаллических детекторов (СКД) (см. рис. 1), на которую устанавливается кристалл, и систему управления СКД.

По мере увеличения числа потребителей пучка, выводимого из У-70 с использованием кристаллических дефлекторов, и расширения экспериментальных исследований кристаллических дефлекторов, увеличивалось количество различных новых СКД на периметре ускорителя, и систем управления этими станциями. Для каждого нового потребителя пучка создавалась конкретно своя станция и система управления в зависимости от длины¹ используемого кристалла, угла² изгиба кристалла, требуемой выводимой интенсивности и метода³ вывода пучка. Важно отметить, что конструкции каждой такой СКД отличались друг от друга, как и системы управления этими СКД.

Кроме того, продолжительная практика работы выявила ряд недостатков конструкции разработанных ранее станций и их систем управления, таких как “выбег” каретки при установке на заданную координату, ограниченность диапазонов радиального и углового перемещений, необходимость различных схемных решений при создании аппаратуры управления горизонтальным и угловым перемещениями, сложность ремонта большого парка уникальных электронных модулей собственной разработки.

Для того чтобы обеспечить надежную эксплуатацию различных кристаллических дефлекторов (сейчас в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ используется и планируется использовать около десяти различных кристаллических дефлекторов) и устранить имеющиеся недостатки, была разработана новая унифицированная станция кристал-

лических дефлекторов и новый аппаратно-программный комплекс управления унифицированной станцией кристаллических дефлекторов. Было проведено тестирование нового оборудования в нескольких сеансах на У-70, которое позволило доработать рабочий прототип до серийного образца и подтвердило успешность проведенной модернизации.

УНИФИЦИРОВАННАЯ СТАНЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ

Станция кристаллических дефлекторов устанавливается в специальную врезку (“стакан”) в вакуумную камеру У-70, после монтажа на рабочее место она становится частью вакуумного объема ускорителя. На рис. 2 представлена полученная после модернизации унифицированная СКД.

Станция осуществляет тонкие угловые и линейные перемещения кристаллических дефлекторов, находясь в жестких условиях работы: в циклическом магнитном поле ускорителя, которое может варьироваться от 0 до 1.2 Тл, в условиях вакуума 10^{-7} торр, в условиях радиации с высокой мощностью дозы 0.01 Зв/ч. Промышленность выпускает

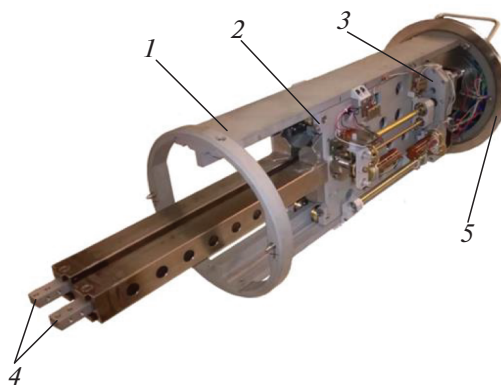


Рис. 2. Унифицированная СКД. 1 – Каркас СКД, 2 – каретка линейных перемещений, 3 – корпус редуктора, 4 – кронштейн-держатель кристаллов, 5 – фланец вакуумного соединения.

¹ Длина кристалла варьируется от нескольких мм до 7–8 см.

² Угол изгиба используемых кристаллов варьируется от сотен мкрад до сотен мрад (т.е. на три порядка).

³ В некоторых задачах используется “отраженный” пучок.

прецизионные вращательные платформы и линейные трансляторы, но они не могут работать в перечисленных условиях, эта сложная задача была решена в представленной конструкции. Точность позиционирования кристаллических дефлекторов унифицированной станцией обеспечена применением шаговых двигателей в комбинации с оптимально подобранными редукторами. Благодаря сухой смазке изделие способно долговременно работать в вакууме. Станция изготовлена исключительно из немагнитных материалов. Электродвигатели вынесены на значительное расстояние (около 1 м) из зоны высокой радиации и магнитного поля.

Представим более подробное описание составных частей СКД и их взаимную связь.

1) Каркас СКД представляет собой две направляющие пластины (габаритные размеры 500×70 мм), обсаженные двумя кольцами (диаметр 200 мм), направляющие закреплены на кольцах симметрично относительно друг друга в вертикальной плоскости. В направляющих пластинах выполнены проточки, по которым на четырех роликах движется каретка линейных перемещений. Ход каретки — 150 мм.

2) Каретка линейных перемещений — подвижная платформа (160×230 мм), на которой установлены: механизм угловых перемещений (приводимый в движение посредством пары конических зубчатых колес), коромысло угловых перемещений, на конце которого расположен кронштейн-держатель кристаллического дефлектора, многооборотный потенциометр углового перемещения. При этом универсальность конструкции заключается в том, что она может использоваться с дефлекторами различных длин (от нескольких мм до нескольких см) и углов. Так как станция позволяет выводить пучок на конкретный эксперимент, то обычно используется два близких по свойствам дефлектора, например, с углом изгиба 75 и 77 мрад. Это позволяет при организации вывода выбрать оптимальный режим, а в случае выхода из строя по различным причинам одного из дефлекторов⁴, осуществлять вывод пучка в сеансе с использованием второго дефлектора без ремонта станции (замены дефлектора), не прекращая работу ускорительного комплекса.

3) Двигатели радиального и углового перемещения, редукторы радиального и углового перемещения, многооборотный потенциометр радиального перемещения установлены на неподвижной платформе-корпусе редуктора.

4) Радиальное движение кристаллического дефлектора, установленного на кронштейне держа-

теле, обеспечивается передачей вращения с вала двигателя радиального перемещения через редуктор на винт, вращение которого перемещает каретку линейных перемещений.

5) Угловое перемещение кристаллического дефлектора обеспечивается путем передачи вращения с вала двигателя углового перемещения через редуктор на механизм угловых перемещений, который поворачивает коромысло угловых перемещений, а с ним и кристалл, вокруг вертикальной оси.

6) Подвижные контакты, установленных на СКД потенциометров (тип ППМЛ-И-10), соединены посредством зубчатых колес с валами двигателей, соответственно углового и радиального перемещения. Таким образом эти потенциометры служат для преобразования механического движения в аналоговый сигнал (0–5 В) и обеспечивают необходимую точность установки кристалла в пространстве.

Фланец вакуумного соединения СКД с боксом ионопровода ускорителя имеет два 30-контактных вакуумных разъема (2РМ42КПН30Ш2В1), обеспечивающих электрические соединения СКД с системой дистанционного управления СКД, с помощью двух многожильных кабелей. Управление станцией осуществляется дистанционно, с помощью автоматизированной системы управления СКД.

Некоторые технические характеристики унифицированной СКД:

1. Диапазон радиального перемещения кареток 150 мм.
2. Диапазон перемещения кристалла по углу 40 мрад.
3. Точность позиционирования кристалла по радиусу 0.1 мм.
4. Точность позиционирования кристалла по углу 10 мкрад.
5. Конструкция СКД рассчитана на рабочий уровень вакуума 10^{-7} мм. рт. ст.

ОПТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СКД

Перед установкой в тоннель ускорителя унифицированная СКД была проверена на точность механики с помощью лазерных автоколлиматоров по методике, описанной в работе [10, стр. 86]. На рис. 3 показаны результаты измерения неравномерности угла вращения установленного на СКД кристалла с помощью сравнения оптических измерений реального углового перемещения с интервалом движения двигателя, задаваемого в шагах программой.

Измеренный уровень неравномерности движения не превышает величины 10 мкрад, сравнимой с величиной минимального шага углового перемещения и достаточной для проведения опытов с кристаллами на пучке У-70.

⁴ Неисправности могут быть связаны как с механической и электронной системой станции, так и с разрушением самого дефлектора в условиях высокой радиационной нагрузки.

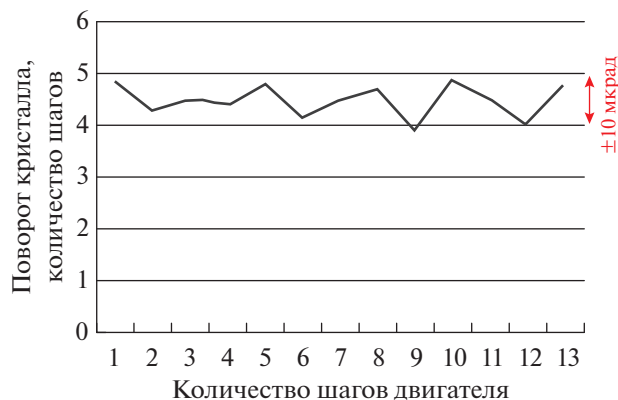


Рис. 3. Оптическая проверка равномерности угловых перемещений: на рисунке поворот кристалла, измеренный оптически по зеркальной поверхности кристалла, соотносится с углом вращения шагового двигателя.

КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКД

Комплекс автоматизированного управления СКД (рис. 4) состоит из двух функциональных частей, а именно управляющей и периферийной.

Управляющая часть многофункционального комплекса автоматизированного управления содержит ПЭВМ со специально разработанным программным обеспечением, и располагается на пульте систем вывода заряженных частиц из ускорителя У-70. Периферийный блок управления расположен в непосредственной близости от станции кристаллических дефлекторов, в подвале ускорительного зала, где радиационное поле существенно ниже, чем на орбите У-70.

Взаимодействие управляющего с периферийным блоком происходит по протоколу RS-485. Скорость обмена 19200 бод. Обмен информацией между управляющим и периферийным блоком происходит по упрощенному варианту протокола в стандарте МЭК-1107.

В состав периферийного блока входят:

1. Микропроцессорный модуль “M128-DRV-4”;
2. Модуль сигма-дельта АЦП “ADC8-24”;
3. Модуль драйверов для управления 4-мя шаговыми двигателями “DRV-4М”;
4. Модульный источник питания AC250/24-12-5;
5. Стабилизированный источник питания для ППМЛ.

Периферийный блок подключается к станции кристаллических дефлекторов короткими перемычками кабелей типа ТПКВ24. Длина кабелей ограничивается наводками на сигнальные проводники.

Микроконтроллер, входящий в состав периферийного блока, осуществляет управление СКД, выдавая сигналы драйверу шаговых двигателей, получает и обрабатывает информацию с концевых выключателей и измерительных потенциометров, установленных на СКД.

ПО состоит из двух частей: программы управления СКД, выполняющейся на микроконтроллере в модуле M128-DRV-4 и программы рабочего места оператора, код которой исполняется на ПЭВМ, находящейся на пульте СВ.

Работа комплекса автоматизированного управления СКД осуществляется следующим образом. При калибровке станции определяются функции зависимости величины напряжения, снимаемого с потенциометров, от величины перемещения кристаллического дефлектора между крайними поло-

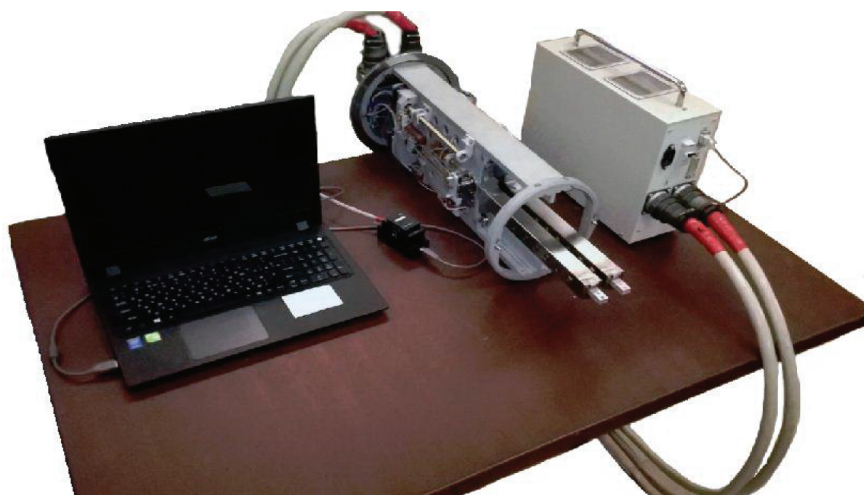


Рис. 4. Наладочный стенд многофункционального комплекса автоматизированного управления СКД: слева — управляющая часть, в центре — СКД, справа — периферийный блок электронных модулей.

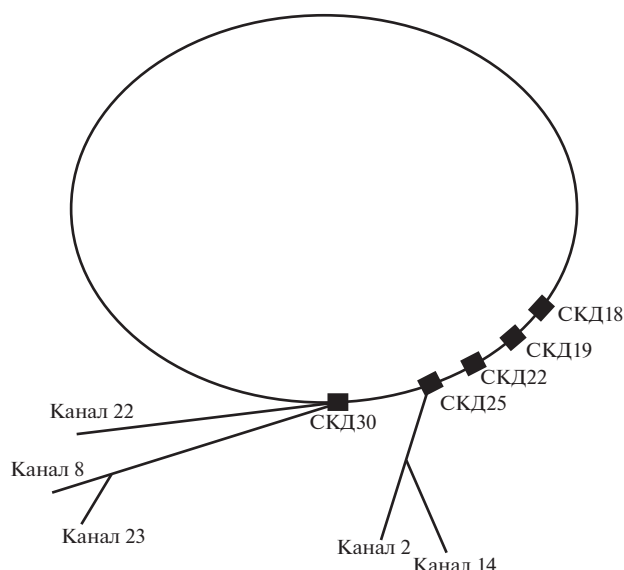


Рис. 5. Размещение унифицированных станций в У-70. Цифры соответствуют номеру магнитного блока У-70, в котором смонтирована СКД.

жениями в радиальном и угловом направлении. Создается таблица калибровочных параметров, которая содержит исходные данные для решения задач управления. Оператор задает необходимое для работы значение координаты и отдает команду на исполнение. Если текущая координата не соответствует заданному значению, то ЭВМ определяет величину рассогласования между измеренным значением напряжения, снимаемого с потенциометра, и значением из таблицы соответствия. Соответствующая команда отработки поступает на исполнение. Описанный выше режим работы называется “Установка на заданную координату” (по радиусу либо по углу). Этот режим использу-

ется для начальной установки кристалла в рабочее положение под пучок заряженных частиц при настройке вывода заряженных частиц из ускорителя, либо для вывода кристалла из пучка заряженных частиц.

Возможен также режим работы “Управление по шагам”. В этом режиме оператор может корректировать положение кристалла, на заранее установленное значение (по радиусу и по углу) с максимальной точностью, приписанное единице “шага”. Техника исполнения такой команды стандартная. Этот режим является основным в процессе настройки вывода заряженных частиц с помощью кристаллических дефлекторов (поиска режима канализации).

Описание системы управления можно найти в [11, 12].

Первый экземпляр новой унифицированной станции и системы управления ее был создан для проведения экспериментов с кристаллами на Протонном радиографическом комплексе (ПРГК-100) на ускорителе У-70 [13].

К настоящему моменту на периметре У-70 смонтированы пять унифицированных СКД. Их расположение представлено на рис.5. Они используются как для установки коротких, так и для длинных дефлекторов. СКД18, СКД19, СКД22 могут обеспечивать пучком потребителей в каналах № 8 и № 22. СКД30 может обеспечивать пучком потребителей в каналах № 8 и № 22, в режиме деления пучка кристаллом. СКД25 может обеспечивать пучком потребителей в каналах № 2 и № 14 [14, 15]. На рис. 6 представлены унифицированные СКД с установленными на них кристаллическими дефлекторами.

Часть из новых унифицированных СКД уже активно используются для проведения экспери-

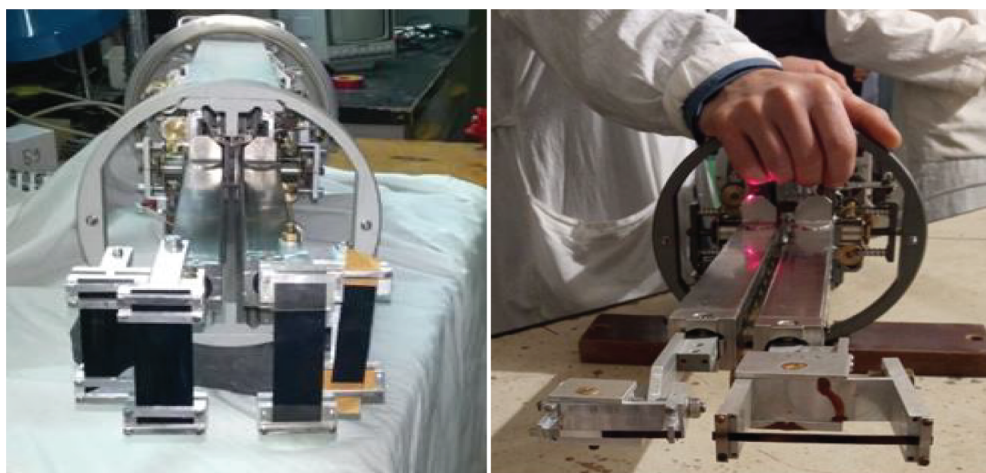


Рис. 6. Унифицированные станции (СКД30 — слева, и СКД25 — справа) с установленными кристаллическими дефлекторами.

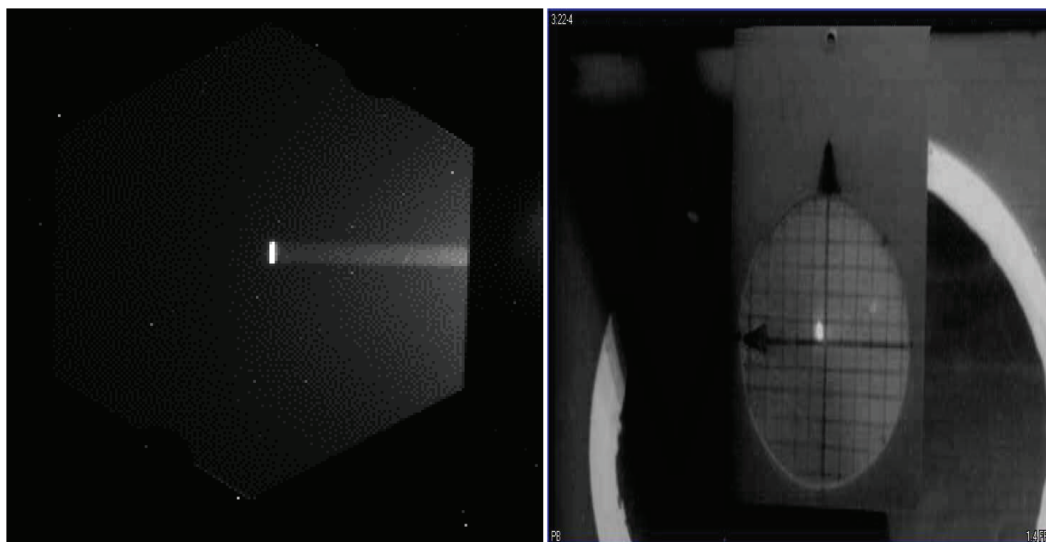


Рис. 7. Фотографии выведенных кристаллическими дефлекторами пучков протонов, обеспечивающих работу потребителей при проведении экспериментов на комплексе ПРГК-100 (слева) и в канале 22 (справа).

ментов и для обеспечения потребителей пучками заряженных частиц в сеансах на У-70. На рис. 7–9 представлены фотоизображения и профили пучков протонов (размеры пучка в различных местах трассы вывода), выведенных при помощи кристаллических дефлекторов (работающих в режиме каналирования), установленных на унифицированных СКД, для вывода на ПРГК-100 и в канал № 22 с СКД 30, СКД18 и СКД19. На рис. 7 слева представлено фото выведенного кристаллом пучка, сделанное на физической установке, при проведении экспериментов по определению функции размытия точки на комплексе ПРГК-100. Кристаллическая станция была установлена непосредственно в канале транспортировки пучка комплекса ПРГК-100. Пучок из У-70 на ПРГК-100 выводился в режиме быстрого вывода, а затем часть этого пучка выводилась кристаллом непосредственно на экспериментальную установку, так как режим быстрого вывода пучка не может обеспечить необходимые условия для проведения данного эксперимента. На рис. 7 справа представлено фото пучка на телевизионном экране канала (транспортировки пучка) № 22, этот пучок был выведен с помощью кристалла установленного на СКД30. СКД30 смонтирована в конце прямолинейного промежутка № 30 магнита У-70. Она обеспечивает работу физических установок, расположенных как на канале № 8 (при медленном выводе в канал № 22), так и на канале № 22 (при медленном выводе в канал № 8) [16]. На рис. 8 и 9 представлены профили пучков выведенных в канал 22 с помощью кристаллов установленных на СКД18 и СКД19, подробно методика настройки такого вывода описана в [17], здесь отметим лишь что эти кристаллы осуществляют заброс пучка

протонов в апертуру септум-магнита (СМ) расположенного в прямолинейном промежутке № 20 магнита У-70 и следующими септум-магнитами отклоняются в канал 22, либо в канал 8, где этот пучок обеспечивает физических установок. Профили пучка, выводимого в канал 14 с помощью СКД 25, приведены ранее в работе [17].

Эффективность использования выведенного пучка заряженных частиц экспериментальной установкой во многом зависит от стабильности положения пучка на внешней мишени и стабильности его размеров. На рис. 7 яркость пятна в центре на несколько порядков превышает интенсивность вторичного пучка (дорожка справа). Размер пучка на рис. 8 и 9 соответствует расчетам. Совокупность этих двух результатов указывает на низкий уровень вибрации при долговременной работе. Другим косвенным показателем является возможность экспериментальных установок работать с выведенным пучком в течение всего сеанса ускорительного комплекса без коррекции положения и угла СКД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов новой конструкции обеспечило улучшение технических характеристик, дало возможность размещать на СКД резервный рабочий кристалл или кристалл с другими параметрами, унификацию и упрощение системы управления угловым и радиальным перемещением кристалла. Это достигается за счет размещения в том же объеме, что и в станциях старого типа, двух кареток вместо одной и применения унифицированных шаговых двигателей.

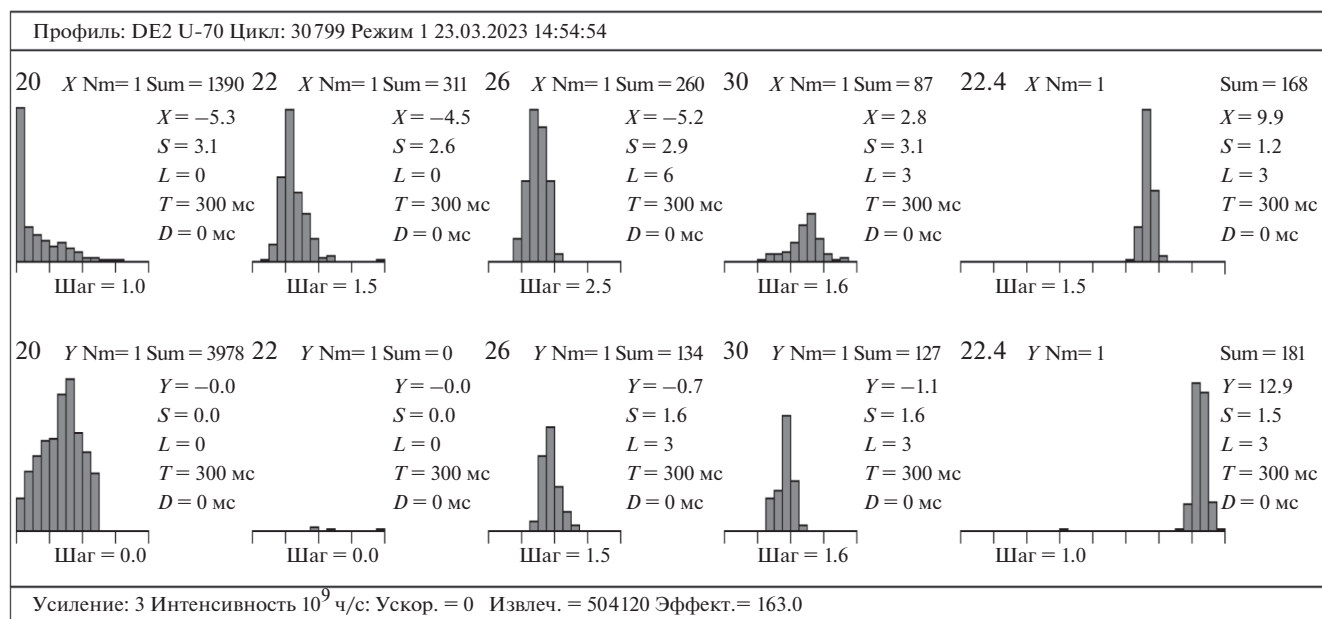


Рис. 8. Профили пучка, выведенного в канал 22 при работе с СКД19. Здесь 20, 22, 26, 30-номера профилометров они соответствуют номерам прямолинейных промежутков магнита У-70, в которых эти профилометры установлены. 22.4-номер профилометра в канале транспортировки пучка.

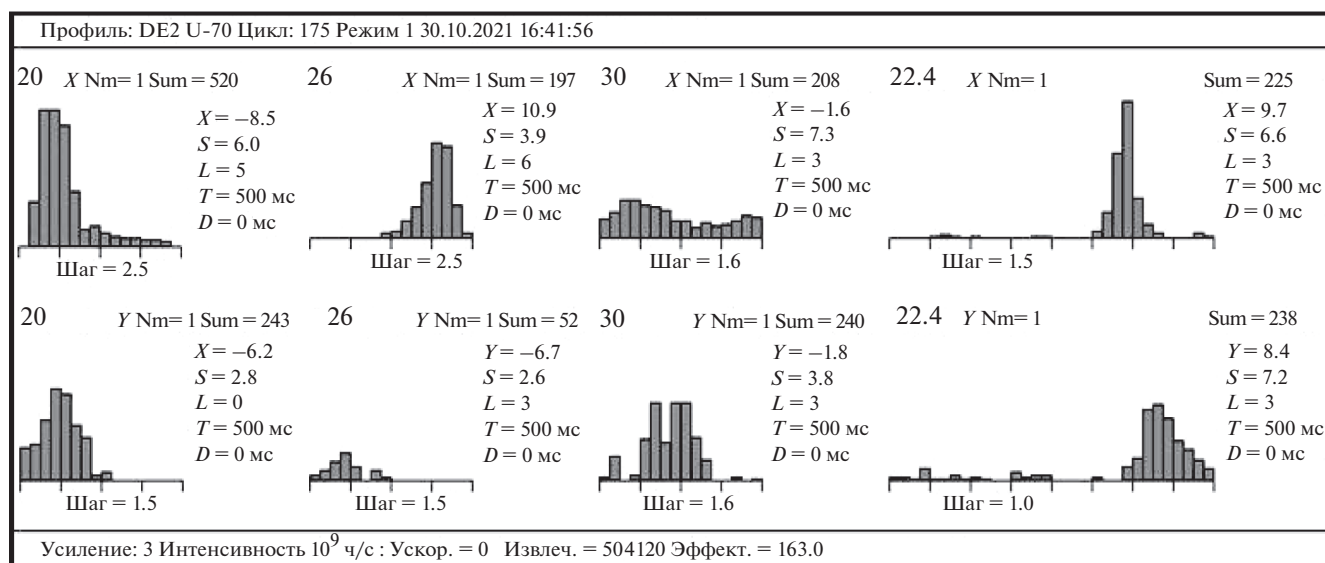


Рис. 9. Профили пучка, выведенного в канал 22 при работе с СКД18. здесь 20,26,30-номера профилометров они соответствуют номерам прямолинейных промежутков магнита У-70, в которых эти профилометры установлены. 22.4-номер профилометра в канале транспортировки пучка.

Создание нового автоматизированного комплекса управления станциями кристаллических дефлекторов дало следующие улучшения:

- значительное повышение точности позиционирования кристаллов;
- улучшение надежности работы СКД в сеансе (даже при проблеме с одним кристаллом возмоз-

жен переход на работу с другим кристаллом без замены);

- существенное повышение оперативности управления выводом пучков частиц высоких энергий;

- значительное упрощение ремонта в случае выхода из строя комплекса управления;

— универсализацию комплекса управления, распространяемую на любую унифицированную станцию кристаллических дефлекторов, расположенную на У-70.

Таким образом создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов и новой системы управления привело к повышению коэффициента использования ускорительного времени при работе ускорителя.

На сегодняшний день идет постепенная замена СКД и систем управления ими на новые унифицированные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Tsyganov E.N.* // Estimates of Cooling and Bending Processes for Charged Particle Penetration through a Mono Crystal. 1976. Fermilab, Batavia. Preprint TM-682, TM-684.
2. *Asseev A.A., Bavizhev M.D., Ludmirsky E.A., Maishev V.A., Fedotov Yu.S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1991. V. 309 (1–2). P. 1–4.
3. *Мочалов В.В., Васильев А.Н., Рязанцев А.В. и др.* // Приб. тех. эксперим. 2010. № 5. С. 5–12 [*Mochalov V.V., Vasiliev A.N., Ryazantsev A.V., et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2010. V. 53. P. 621–628.]
4. *Vasilev A.N. et al.* // Phys. At. Nucl. 2004. V. 67. P. 1487.
5. *Vasiliev A.N., Grishin V.N., Davidenko A.M. et al.* // Phys. At. Nucl. 2005. V. 68. P. 1790–1795.
6. *Abramov V.V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2014. V. 77. P. 595.
7. *Abramov V.V. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54 (1). P. 69–184.
8. *Afonin A.G., Birykov V.M., Kotov V.I. et al.* // First results on study of optimal crystal extraction at 70 GeV IHEP accelerator. Proc. EPAC-98. Stockholm, Sweden. 1998. V. 3. P. 2114–2116.
9. *Афонин А.Г., Баранов В.Т., Бирюкови В.М. др.* // Физ. элемент. част. ат. ядра. 2005. Т. 36 (1). С. 43–99.
10. *Biryukov V.M., Chesnokov Y.A., Kotov V.I.* // Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. 1997. Berlin: Springer.
11. *Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M., et al.* // Phys. Part. Nucl. 2005. V. 36 (1). P. 21–50.
12. *Афонин А.Г., Барнов Е.В. и др.* Развитие аппаратно-программных средств системы медленного вывода с использованием кристаллических дефлекторов на синхротроне У-70. Препринт ИФВЭ 2017-3. 2017. Протвино: ИФВЭ.
13. *Максимов А.В.* Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50–70 ГэВ на базе синхротрона У-70. Докт. дисс. 2017. Протвино: ИФВЭ.
14. *Брюнетон К., Быстрицкий И., Гедо А. и др.* // Приб. техн. эксперим. 1976. № 5. С. 46–51.
15. *Raoul J.C., Autones P., Auzolle R.* // Nucl. Instrum. Methods. 1975. V. 125 (4). P. 585. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(75\)90476-0](https://doi.org/10.1016/0029-554X(75)90476-0)
16. *Архипенко А.А., Афонин А.Г., Баранов В.Т. и др.* Деление пучка протонов с энергией 50 ГэВ слабо-возмущающим кристаллическим сплиттером. Препринт ИФВЭ 2008–8. 2008. Протвино: ИФВЭ.
17. *Решетников С.Ф., Афонин А.Г., Барнов Е.В. и др.* // Ядерн. физ. инжинир. 2025. V. 16 (1). P. 80–86. <https://doi.org/10.56304/S2079562924060307>

Unified Crystal Station at U-70 Accelerator

**S. F. Reshetnikov^{1,*}, A. G. Afonin¹, E. V. Barnov¹, A. Y. Levin¹,
V. V. Mochalov^{1,2}, M. N. Ukhanov¹, and Y. A. Chesnokov¹**

¹National Research Centre “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, 142281 Russia

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

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

Received July 9, 2025; revised July 29, 2025; accepted August 1, 2025

Abstract—The results of development, creation, and use of a unified crystal station (CS) at the U-70 accelerator complex are presented. This station is used for proton beam extraction directly from the U-70 accelerator vacuum chamber using the channeling effect. The station performs fine angular and linear movements of crystal deflectors under harsh operating conditions: in a cyclic variable magnetic field of the accelerator, in high vacuum, and at high radiation dose rates. The components of the unified CS and their interrelation are described in detail. An automated control system for the unified CS is presented. The advantages of the unified CS over the previous generation CS are shown. The results of the unified CS operation with proton beams in U-70 sessions are presented.

Keywords: accelerator technology, extraction systems, crystal deflector, crystal deflector station