

УДК 621.384.6

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ПРОЕКТА DARIA

© 2023 г. С. А. Гаврилов^{a, b, *}, А. И. Титов^{a, b}

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141700 Россия

*e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Поступила в редакцию 29.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Диагностика пучка является одной из основных задач при эксплуатации ускорителей заряженных частиц. В работе представлена концепция системы диагностики пучка, позволяющей проводить измерения и осуществлять контроль ключевых параметров пучка линейного резонансного ускорителя протонов в составе компактного источника нейтронов DARIA: ток, положение, профиль, эмиттанс, энергия, фазовые характеристики. Важным требованием является необходимость проведения измерений в наладочном режиме ускорителя, когда параметры пучка могут меняться в широком диапазоне. В основной состав системы предложено включить такие типы диагностических устройств, как индукционные датчики тока, полосковые датчики положения пучка, проволочные профилометры, ионизационный монитор поперечного сечения пучка, щелевой измеритель эмиттанса, измеритель формы сгустков, охлаждаемый цилиндр Фарадея. Особое внимание уделено использованию неразрушающих методов диагностики для обеспечения непрерывного оперативного контроля параметров пучка ввиду его большой проектной импульсной и средней мощности в совокупности с относительно низкой энергией. Рассмотрены основные физические принципы работы, типичные характеристики, а также особенности практической реализации отдельных устройств. Представлена схема возможного размещения диагностических узлов с учетом специфики использования предложенных типов детекторов в различных частях ускорителя.

Ключевые слова: линейный ускоритель протонов, система диагностики пучка, индукционный датчик тока, цилиндр Фарадея, проволочный сканер, ионизационный монитор поперечного сечения, измеритель эмиттанса, датчик положения пучка, измеритель формы сгустков.

DOI: 10.31857/S1028096023070051, EDN: TEGYLG

ВВЕДЕНИЕ

Проект DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) – компактный источник нейтронов для фундаментальных исследований, промышленных приложений и образовательных задач, разрабатываемый на основе сильноточного линейного ускорителя протонов [1] с проектными характеристиками, указанными в табл. 1.

Одной из ключевых систем ускорителя является система диагностики пучка, контролирующая ток, поперечные (профиль, положение, эмиттанс) и продольные характеристики пучка (энергия, разброс по импульсам, фаза и форма сгустков) и, как правило, включающая в себя три типа измерителей. Во-первых, надежные быстрые детекторы, показывающие основные параметры пучка, ис-

пользуемые для быстрой проверки общей функциональности ускорителя. Данные устройства обычно не разрушают пучок, обеспечивая возможность непрерывного оперативного контроля, и представляют результаты измерений в виде одного числа, простого графика или двумерного изображения. Во-вторых, оборудование, используемое для ежедневных проверок качества и стабильности параметров пучка, а также для измерений в процессе перестройки параметров ускорителя. Этот тип измерителей, как правило является возмущающим, но позволяет получать больше информации о пучке. В-третьих, сложное диагностическое оборудование, используемое для настройки новых режимов работы или новых компонентов ускоряющей структуры, а также для поиска решений по оптимизации и расширению функциональных возможностей машины. Такие

Таблица 1. Основные характеристики пучка протонов проекта DARIA

Характеристика	Значение
Энергия пучка на выходе источника, МэВ	0.06
Энергия пучка на выходе резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, МэВ	3.3
Энергия пучка на выходе ускорителя, МэВ	13
Импульсный ток, мА	До 100
Длительность импульса тока, мкс	100
Частота следования импульсов, Гц	До 100
Частота следования сгустков, МГц	162.5

устройства могут быть сложны в эксплуатации и полностью разрушать пучок на время измерений, а их отличительной особенностью является предоставление многопараметрической информации о пучке.

Очевидно, что между этими типами оборудования нет четких границ, тем не менее подобная классификация весьма полезна, для того чтобы выстроить приоритеты при проектировании системы диагностики.

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ПУЧКА

Из соображений наибольшей универсальности, вакуумной совместимости, помехоустойчивости, возможности проведения абсолютной калибровки и, главное, величины ожидаемых тепловых нагрузок, в случае использования контактных методов измерений наиболее подходящими измерителями тока для высокоточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA являются индукционные датчики тока (ИДТ, трансформаторы тока) [2], которые предложено использовать для проведения основных оперативных измерений как импульсного, так и среднего тока пучка во всем ожидаемом диапазоне интенсивностей.

Для корректного измерения импульсов тока пучка с длительностью больше 1–2 мкс необходимо использовать активный тип трансформатора с трансимпедансным предварительным усилителем и увеличивать индуктивность системы за счет использования сердечника с высокой магнитной проницаемостью, а не увеличения количества витков обмотки N , так как измеряемый сигнал $\propto 1/N$. Одновременно с этим для получения короткого времени нарастания сигнального импульса, и как следствие быстрого отклика системы, необходимо снижать паразитную емкость, сокращая длину кабеля между ИДТ и усилителем. Еще одним значимым фактором в конструкции ИДТ является многослойная защита от статических и переменных магнитных полей [3].

На рис. 1 представлена модель ИДТ на основе ферритового [4] кольца с магнитной проницае-

мостью ~ 4000 . Внутренний экран сердечника может быть изготовлен в виде корпуса из магнитомягкой стали с симметричной кольцевой щелью для проникновения магнитного поля пучка, а внешний экран – из листов магнитной нержавеющей стали, оклеенных изнутри фольгой из аморфного сплава кобальта и железа с магнитной проницаемостью $\sim 10^5$. Также для подавления наводок и помех различной природы можно использовать дифференциальный способ съема сигнала с использованием экранированной витой пары.

Исторически первым устройством, позволяющим проводить прямые абсолютные измерения тока пучка, является цилиндр Фарадея, который часто используют в качестве эталона для калибровки других измерителей. Так как принцип работы цилиндра Фарадея основан на полном поглощении пучка в сигнальном электроде, то на практике возможны несколько вариантов использования этого устройства: в виде стационарной ловушки пучка на выходе поворотного магнита или канала транспортировки либо в виде подвижной конструкции, вводимой в пучок на время измерений.

В виду высокой средней и импульсной мощности пучка ускорителя проекта DARIA предложено использовать подвижный охлаждаемый цилиндр Фарадея (рис. 2), играющий одновременно роль аварийной ловушки пучка, только в низкоэнергетическом канале транспортировки, где средняя ожидаемая мощность пучка не превышает 100 Вт. Далее, начиная с выхода резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, где средняя мощность пучка достигает ~ 3.3 кВт, следует использовать индукционные датчики тока для обеспечения неразрушающих токовых измерений. При необходимости создания отдельной подвижной ловушки пучка на выходе ускорителя (где средняя мощность пучка составляет ~ 13 кВт) возможно использование относительно простых конструкций, предназначенных только для процесса теплосъема и не включающих в себя весь комплекс мер по измерению импульсов тока пучка, свойственных цилиндрам Фарадея [5].

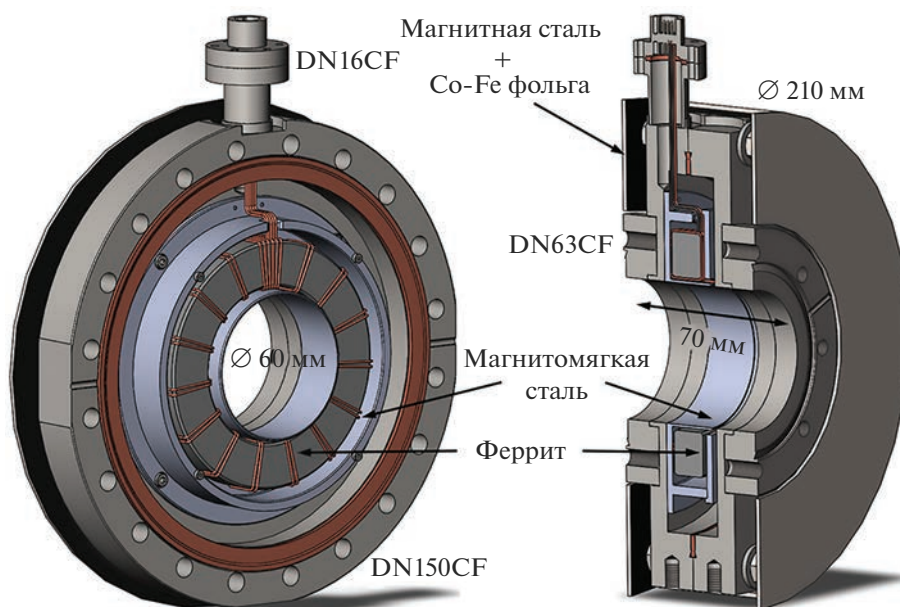


Рис. 1. Модель ИДТ в сборе с внешней магнитной защитой.

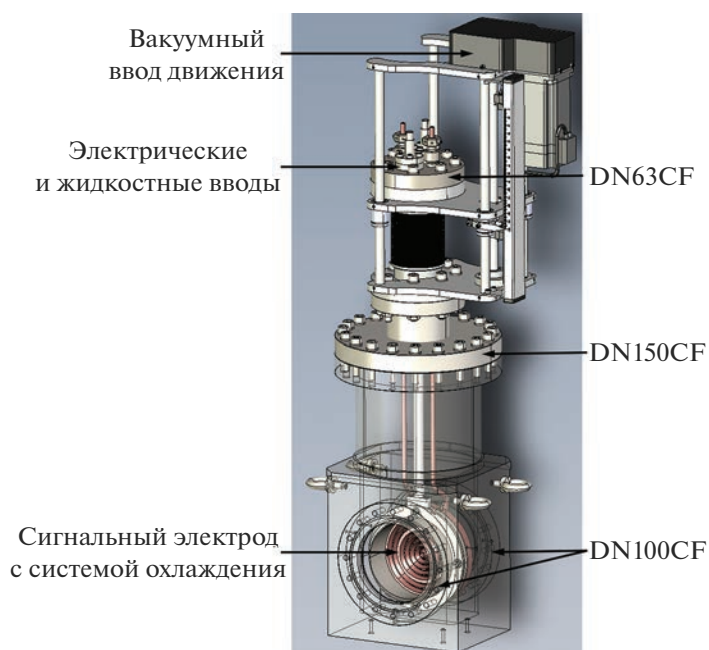


Рис. 2. Модель охлаждаемого цилиндра Фарадея с вакуумным вводом движения.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Другим важным параметром пучка является его поперечный профиль, который постоянно меняется вдоль ускорителя под воздействием системы фокусировки, и его контроль необходим для проведения процедуры согласования поперечной динамики пучка между различными частями ускорителя и каналов транспортировки.

Проволочные сканеры и, тем более, многопроволочные профилометры относятся к классу возмущающих, а при низких энергиях пучка разрушающих, устройств диагностики, использование которых для непрерывного контроля параметров пучка ограничено, как существенным возмущением пучка в процессе измерений, так и деградацией проволок под действием радиационных и тепловых нагрузок [6]. В связи с ожидаемой

высокой интенсивностью пучка использование контактных датчиков имеет существенные ограничения по допустимым режимам эксплуатации, поэтому предложено ограничить использование проволочных сканеров задачами прецизионных измерений на этапах наладки отдельных частей ускорителя, когда работа ведется с пучком низкой или умеренной интенсивности, а на этапе эксплуатации использовать исключительно неразрушающие методы диагностики на основе свечения [7] и ионизации [8] остаточного газа в ионопроводе ускорителя.

Ускоренные заряженные частицы, проходя по каналу транспортировки пучка, вызывают ионизацию остаточного газа. Число образовавшихся ионов в единице объема прямо пропорционально интенсивности пучка и давлению остаточного газа. Посредством регистрации образовавшихся ионов и/или электронов и анализа их распределения можно осуществлять процедуры неразрушающей диагностики, например, проводить измерения профилей и положения пучка. В частности, с помощью ионизационного монитора поперечного сечения пучка [9] (рис. 3) можно регистрировать двумерное поперечное распределение плотности частиц пучка, из которого с помощью интегрирования по одной из поперечных координат может быть найден профиль пучка по другой поперечной координате, аналогичный профилям, измеряемым, например, с помощью проволочных сканеров или одномерных ионизационных профилометров. Следует отметить, что обработка результатов измерений профилей позволяет определить положение центра тяжести пучка.

Особым требованием является необходимость проведения измерений в наладочном режиме ускорителя, когда потери пучка на начальном этапе настройки могут достигать 10% и более. В этом случае распределение интенсивности пучка в поперечном сечении может быть достаточно сложной формы. Многолетний опыт работы с ионизационным монитором поперечного сечения пучка на сильноточном ускорителе протонов ИЯИ РАН показал, что для хорошо настроенного пучка форма его поперечного сечения близка к эллиптической и стабильна во времени. Неизменность формы и положения, как правило, свидетельствуют об устойчивой работе ускорителя, поэтому, помимо использования для основных диагностических задач по измерению профилей и положения пучка, ионизационный монитор поперечного сечения пучка является хорошим инструментом для обобщенного контроля качества формирования и проводки пучка.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ЭМИТТАНСА ПУЧКА

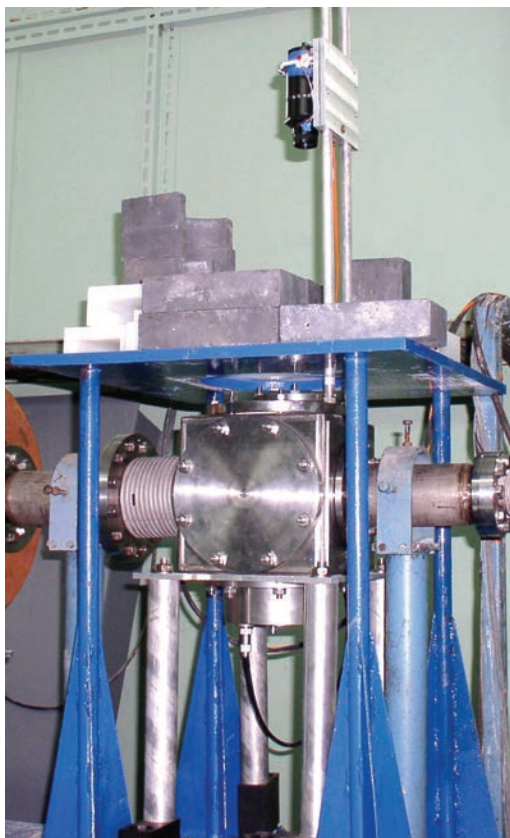
В общем случае параметры пучка можно описать функцией распределения в шестимерном фазовом пространстве $\Phi(x, p_x, y, p_y, s, E)$, где x, y, s — координаты, p_x, p_y — проекции импульса пучка на соответствующие оси, E — энергия пучка. Проекции импульса могут быть заменены на угловые расхождения x', y' . Отдельно выделяют проекции фазового пространства на поперечные направлению движения пучка фазовые плоскости (x, x') , (y, y') и продольную плоскость (s, E) . Исследование распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях необходимо для моделирования динамики пучка при помощи различных транспортных кодов.

Существует два принципиально разных способа измерить поперечный эмиттанс пучка: при помощи специальных измерителей эмиттанса или с использованием косвенных процедур восстановления эмиттанса.

Первый способ подходит для измерений параметров пучков низких (до 10 МэВ) энергий, и в случае проекта DARIA можно использовать классический щелевой измеритель эмиттанса (рис. 4). Пространственное разрешение данного прибора определяется размером щели и на практике может составлять ~100 мкм. Щелевой измеритель эмиттанса проводит пошаговое пространственное сканирование пучка, однако, благодаря наличию многопроволочного профилометра, для измерения углового распределения пучка в заданной координате требуется только одно измерение. Одной из основных проблем, возникающих при практической реализации щелевого измерителя, является сама щель, геометрия которой существенным образом зависит от параметров пучка (рис. 5).

Для проведения измерений высокоинтенсивных пучков с энергией больше нескольких МэВ геометрия щели существенно усложняется (крайняя правая конфигурация на рис. 5). В данном случае базовая толщина пластины, в которой формируется щель, должна быть достаточно большой, чтобы затормозить основную часть пучка, однако одновременно с этим угловой размер щели должен оставаться достаточным для обеспечения нужного диапазона измерений угловых расхождений вырезанной части пучка, кроме того, необходимо снизить локальные тепловые нагрузки на пластину. Для выполнения этой совокупности условий изготавливают щель с выраженной клиновидной формой входной поверхности, что увеличивает площадь взаимодействия пластины с пучком и обеспечивает минимизацию ее толщины в области сквозного разреза.

(a)



(б)

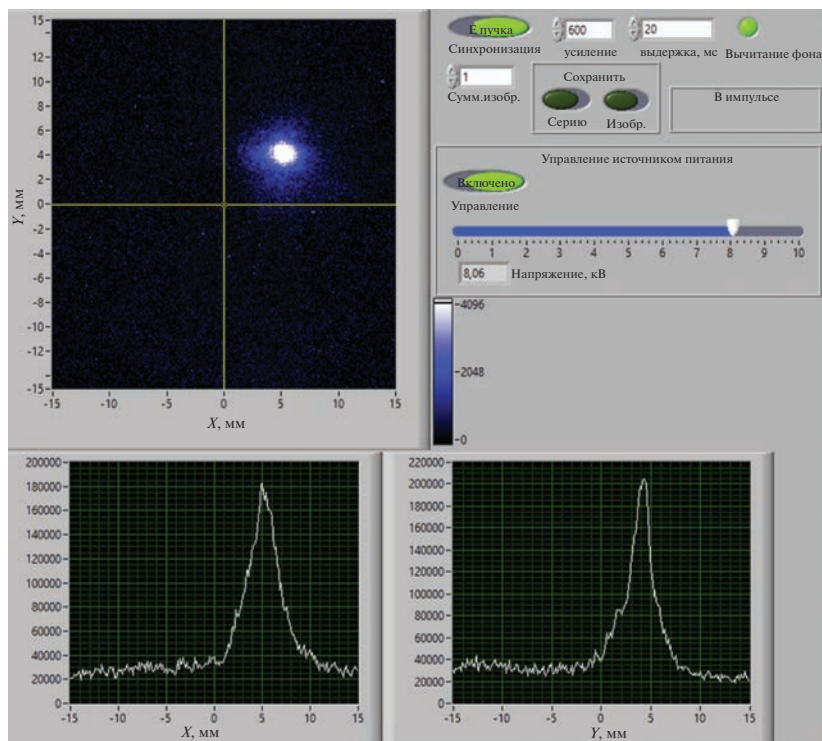


Рис. 3. Ионизационный монитор поперечного сечения пучка на выходе ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН (а) и рабочее окно программы регистрации и обработки данных, в котором отображены регистрируемое видеокамерой двумерное поперечное сечение пучка и полученные из него профили пучка по осям X и Y , а также элементы управления видеокамерой (б).

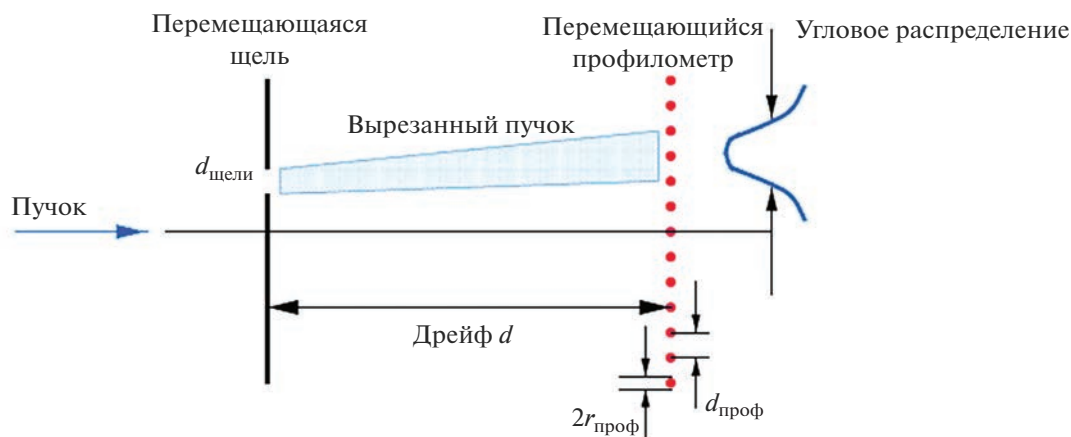


Рис. 4. Схема измерений при помощи щелевого измерителя эмиттенса.

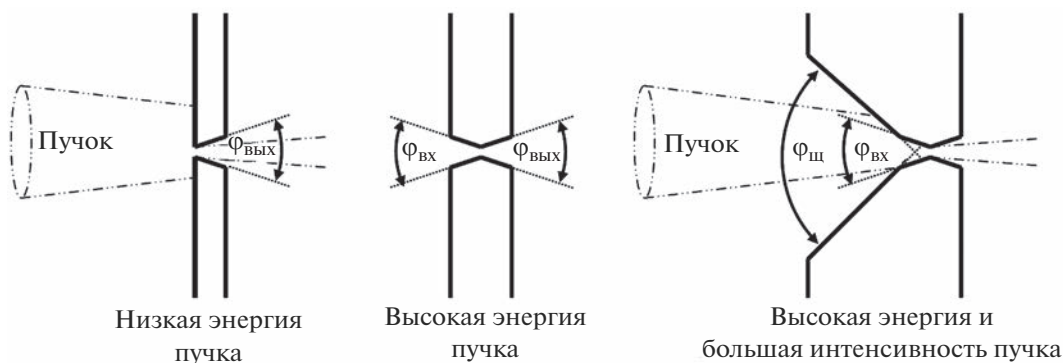


Рис. 5. Типичная геометрия щелей для разных параметров пучка.

Тепловые нагрузки от взаимодействия с пучком также влияют и на общую толщину пластины, и при измерении высокоинтенсивных пучков для подобных щелевых диафрагм требуется активное охлаждение [10].

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Чаще всего в современных резонансных ускорителях ионов поперечное положение центра тяжести пучка, а также его фазовое положение относительно ускоряющей гармоники ВЧ-поля определяют с помощью емкостных пикап-электродов, принцип действия которых заключается в измерении тока изображения, индуцированного электрическим полем пучка в изолированной металлической пластине. Для измерений положения пучка используют четыре емкостных пластины, суммы и разности сигналов с которых позволяют определить положение центра тяжести пучка. Такие устройства традиционно называют датчиками положения пучка и располагают возле каждой квадрупольной линзы. Поскольку электрическое

поле сгруппированного пучка зависит от времени, на пластине возникает сигнал от переменного тока, сбор которого осуществляется с помощью ВЧ-методик и технологий (рис. 6) [11].

Фазовые измерения необходимы для проведения процедуры продольного согласования ускоряющих секций (фазирования). Благодаря дифференциальной форме сигнала от тока пучка центр сгустка и его положение относительно синхронной фазы ускоряющей гармоники могут быть определены с высокой точностью [12]. Кроме того, датчики положения пучка, установленные парами, могут быть использованы для проведения времяпролетных измерений энергии пучка.

Одной из модификаций датчиков положения пучка, наиболее часто используемой на ионных линейных резонансных ускорителях для пучков с нерелятивистскими скоростями (энергия < 500 МэВ/нуклон), являются так называемые «короткозамкнутые» полосковые датчики, в которых выходной порт заменен коротким замыканием на корпус датчика, что обеспечивает более простую, компактную и дешевую конструк-

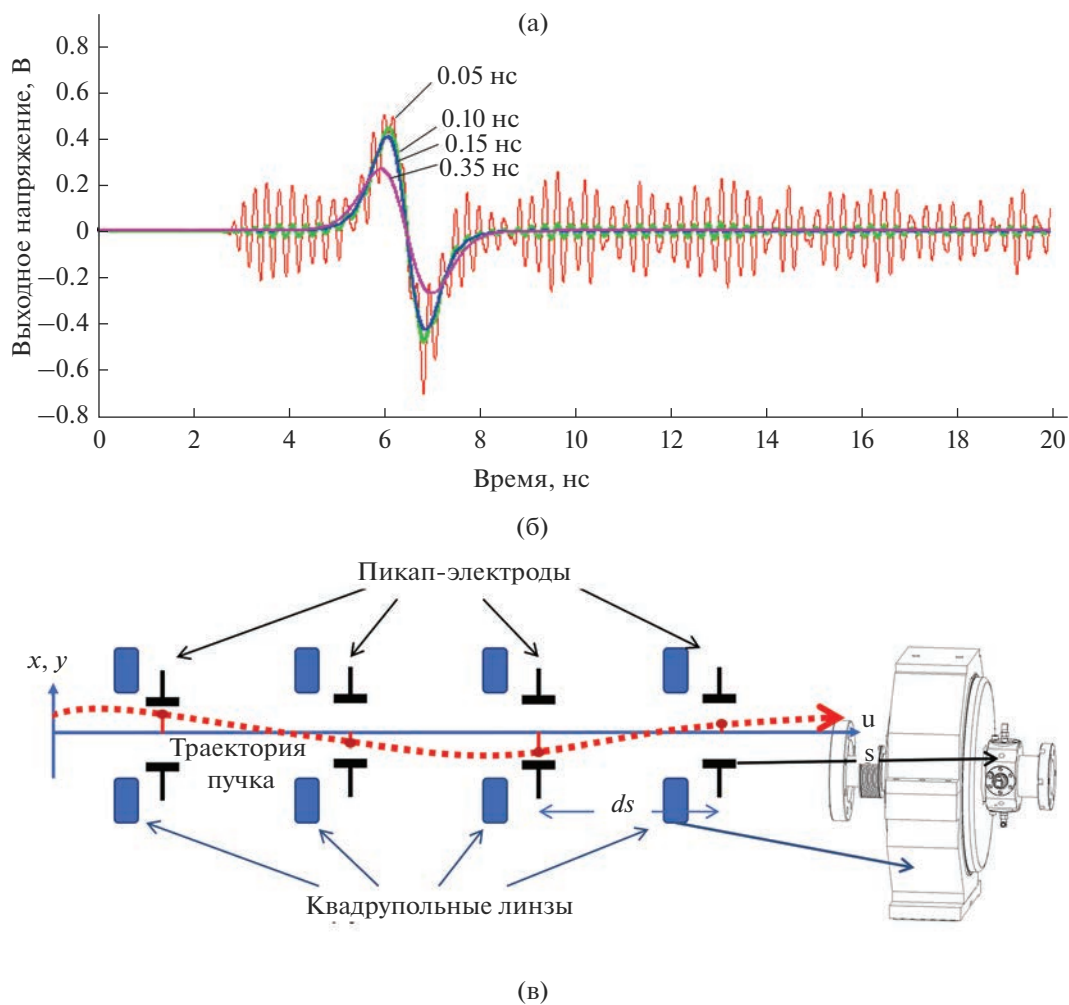


Рис. 6. Пример характерного сигнала с датчика положения пучка при (а) различной точности регистрации (показана цифрами на графике); типичная схема расположения основных узлов регистрации сигнала (б) и фотография конструкции емкостного полоскового датчика положения пучка, используемого на LINAC4 CERN (в).

цию. В основу конструкции датчиков положения пучка для проекта DARIA может быть заложена геометрия датчиков LINAC4 CERN [13], которые

представляют собой короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка с одной парой электродов на каждую плоскость.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА

Продольные параметры пучка важны для настройки и эксплуатации ускорителя так же, как и поперечные, хотя методы их диагностики часто описаны менее подробно. Продольное фазовое пространство удобно определять двумя параметрами: продольным размером сгустка l в единицах времени или фазы, по аналогии с поперечным профилем пучка; разбросом по импульсам (или

по энергиям) $\delta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \frac{\Delta W}{W}$ относительно импульса синхронной частицы, по аналогии с поперечным расхождением пучка. Продольный эмиттанс в этом случае равен $\epsilon_{пр} = \frac{1}{\pi} \iint dl d\delta$.

В отличие от измерений энергетического разброса, которые традиционно проводят с помощью магнитного спектрометра, совмещенного с щелевым коллиматором, экспериментальное исследование структуры пучка (формы сгустков) представляет существенную техническую проблему.

Следует отметить, что фазовый спектр пучка на входе ускоряющего резонатора может быть измерен и без применения специальной аппаратуры. Для этого на выходе резонатора измеряют зависимость тока ускоренных в резонаторе частиц от сдвига фазы ускоряющего поля. При попадании сгустка в область устойчивости происходит возрастание тока ускоренных частиц, и производная измеренной функции по фазе представляет собой фазовый спектр пучка на входе резонатора. К недостаткам этого метода следует отнести необходимость расстройки ускоряющего резонатора, полную потерю пучка в процессе измерений и низкое ($>10^\circ$) фазовое разрешение.

Для измерений формы сгустков в линейных ускорителях ионов в настоящее время применяют только вторичные низкоэнергетические электроны [14]. Их свойства, существенные при измерениях формы сгустков, практически не зависят ни от типа, ни от энергии анализируемого пучка. По этой причине детекторы с использованием вторичных низкоэнергетических электронов применимы для измерений на любых пучках ионов без существенной модификации. Измерители на основе линейной поперечной модуляции стали изготавливать в ИЯИ РАН с 1980-х годов [15–17]. Базовый вариант конфигурации прибора получил название “анализатор фазового спектра” или “измеритель формы сгустков” (Bunch Shape Monitor, BSM) [18] и является детектором для наблюдения продольного распределения заряда в сгустках (рис. 7). Созданные детекторы работают на пучках протонов, отрицательных ионов водорода и тяжелых ионов в диапазоне энергий от 2.5 до 1000.0 МэВ/нуклон.

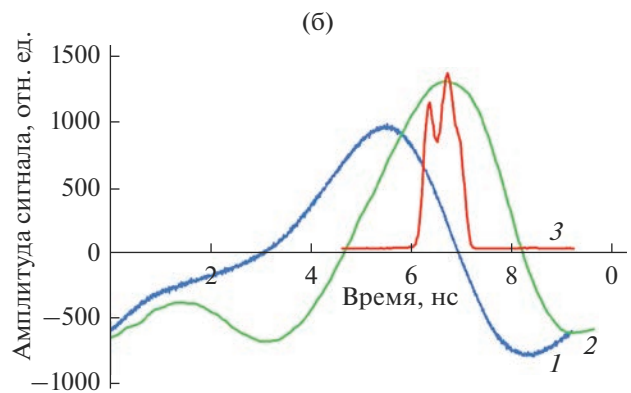


Рис. 7. Измеритель формы сгустков ИЯИ РАН для проекта GSI-FAIR (Германия) (а) и сравнение результатов измерений формы сгустков разными устройствами (б) [19]: пикап-электродами (1); быстрым индукционным датчиком тока (2); измерителем формы сгустков ИЯИ РАН (3).

В большинстве разработанных измерителей имеется возможность регистрировать форму импульсов тока вторичных электронов, что позволяет наблюдать эволюцию формы сгустков в течение импульса тока исследуемого пучка (рис. 8). Эту характеристику можно использовать как обобщенный критерий правильной работы всех си-

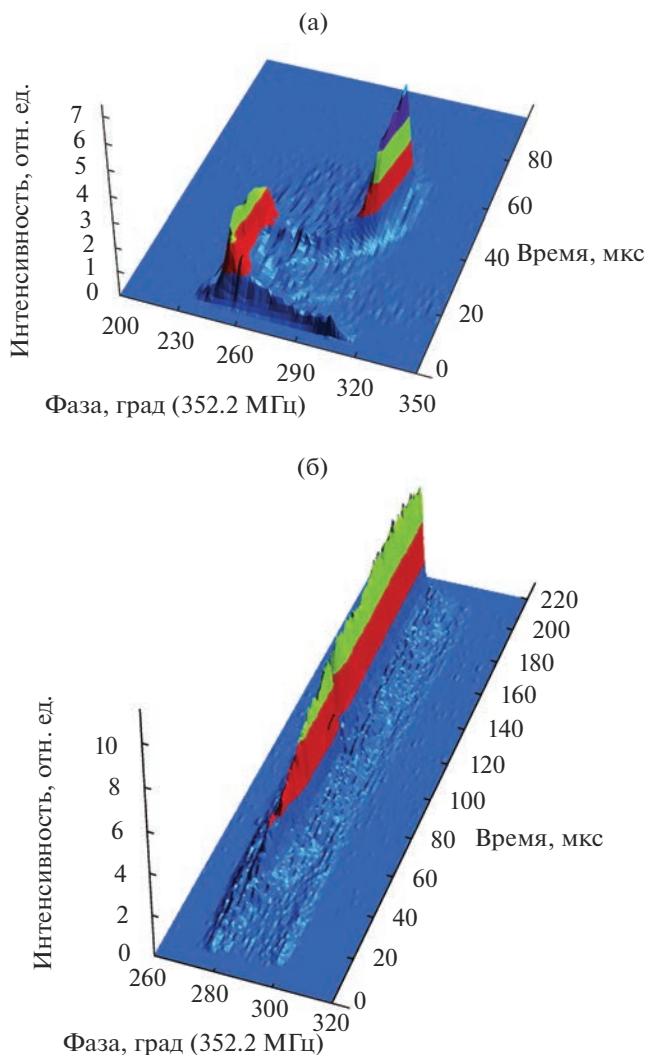


Рис. 8. Пример изменения структуры пучка в течение импульса тока пучка на выходе LINAC4 CERN в процессе настройки (а) и в номинальном режиме работы (б).

стем ускорителя, влияющих на продольную динамику пучка, в том числе и систем стабилизации амплитуд и фаз полей в ускоряющих резонаторах.

Также, в совокупности с методикой сканирования ускоряющих ВЧ-резонаторов, измерители позволяют восстанавливать продольный эмиттанс пучка в виде эквивалентных фазовых эллипсов.

Кроме того, большой динамический диапазон детекторов позволяет проводить измерения продольного ореола сгустка. Получаемые таким образом результаты имеют особое значение для ускорителей с высокой интенсивностью, поскольку наличие ореола приводит к потерям пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проработки концепции системы диагностики пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA предложено использовать следующие детекторы: индукционный датчик тока; охлаждаемый цилиндр Фарадея; проволочные профилометры; ионизационный монитор поперечного сечения пучка; щелевой измеритель эмиттанса; полосковый датчик положения пучка; измеритель формы сгустков.

Одной из основных проблем для диагностики пучка в ускорителе проекта DARIA является значительная импульсная и средняя мощности пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов. В связи с этим, рекомендовано построение системы диагностики на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений. Индукционные датчики тока и емкостные датчики положения пучка для измерений положения, фазы и энергии пучка могут быть стационарно установлены вдоль ускорителя в количестве, достаточном для контроля прохождения пучка вдоль всей ускоряющей структуры.

На выходе ускорителя регистрация положения и поперечного сечения пучка может быть проведена с помощью ионизационного монитора поперечного сечения.

Для измерений профиля пучка на входе и выходе резонатора с пространственно-однородной

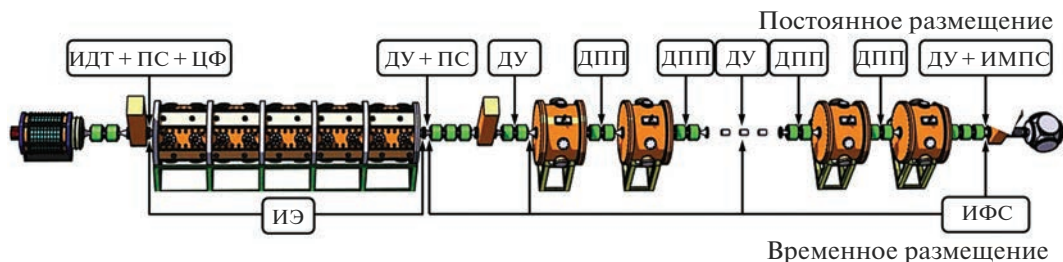


Рис. 9. Схема возможного расположения оборудования системы диагностики вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA. ИДТ — индукционный датчик тока, ЦФ — цилиндр Фарадея, ПС — проволочный сканер, ДПП — датчик положения пучка, ИЭ — измеритель эмиттанса, ИФС — измеритель формы сгустков, ИМПС — ионизационный монитор поперечного сечения, ДУ — диагностический узел, состоящий из ИДТ + ДПП.

квадрупольной фокусировкой наиболее предпочтительными устройствами являются проволочные сканеры, обеспечивающие прецизионные измерения, результаты которых могут быть использованы как для настроечных процедур, так и для моделирования динамики пучка в ускорителе.

С учетом значительной импульсной и средней мощности пучка представляется нецелесообразным использование цилиндров Фарадея, совмещающих функции ловушки и измерителя тока высокоинтенсивного пучка в каналах средних и высоких энергий. Для корректных измерений в таких цилиндрах необходимо использовать большое количество технологических решений, существенно увеличивающих их стоимость по сравнению с простой охлаждаемой ловушкой, рассчитанной на ту же мощность теплосъема. Охлаждаемый цилиндр Фарадея может быть использован в качестве ловушки пучка номинальной интенсивности в низкоэнергетическом канале транспортировки для предварительной настройки пучка перед ускорением в резонаторе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой.

В случае конфигурации низкоэнергетического канала транспортировки, не позволяющей разместить несколько отдельных диагностических устройств с сильфонными и/или ниппельными развязками, возможна разработка единого компактного диагностического бокса, включающего в себя ИДТ, охлаждаемый цилиндр Фарадея и проволочный сканер.

Часто используют только один измеритель эмиттанса и один измеритель формы сгустков в составе отдельного диагностического стенда, который передвигают вдоль ускорителя на протяжении всего процесса ввода в эксплуатацию новых секций [20]. В качестве ловушки пучка для такого стенда может быть использован стационарный охлаждаемый цилиндр Фарадея, конструкция которого существенно упрощена благодаря размещению системы охлаждения вне вакуума ионопровода.

Схема возможного размещения отдельных узлов диагностического оборудования вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA приведена на рис. 9.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках работ по Договору № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 года.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 6. P. 1126.
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. Blokland W. Beam Current Monitors // Proceedings of USPAS and University New Mexico Albuquerque NM, June 23–26, 2009. P. 40.
3. Bayle H. Effective Shielding to Measure beam current from an ion source // *Review of Scientific Instruments*. 2014. V. 85. P. 02A713.
4. Barnes M., Ducimetiere L. Ferrite Materials for In-Vacuum Instruments. // Proceedings of ARIES Workshop "Materials and Engineering Technologies for Particle Accelerator Beam Diagnostics Instruments", 2021.
5. Sosa A., Bravin E, Cantero Esteban, Welsch Carsten. Optimization of a Short Faraday Cup for Low-Energy Ions using Numerical Simulations // International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2014, January 2014. P. 137.
https://www.researchgate.net/publication/287050743_Optimization_of_a_short_faraday_cup_for_low-energy_ions_using_numerical_simulations.
6. Cheymol B. Development of Beam Transverse Profile and Emittance Monitors for the CERN LINAC4, Université Clermont-Ferrand II – Blaise Pascal, 15. 12. 2011.
https://www.researchgate.net/publication/278639201_Development_of_beam_transverse_profile_and_emittance_monitors_for_the_CERN_LINAC4.
7. Bank A., Forck P. Residual Gas Fluorescence for Profile Measurements at the GSI UNILAC // Proceedings of DIPAC2003. Darmstadt: Mainz, Germany, 2003.
https://www.researchgate.net/publication/228390584_Residual_Gas_Fluorescence_for_Profile_Measurements_at_the_GSI_UNILAC.
8. Dimov G. et al. // Soviet Atomic Energy. 1967. V. 22. № 5. P. 441.
9. Gavrilov S., Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. // J. Instrumentation. 2014. M. 9. P. 01011.
<https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/9/01/P01011>
10. Paramo A., Bustinduy I. // Specific Technical Prescriptions for the Manufacturing of the Emittance Meter Unit for the ESS MEBT. MEBT Bilbao Instrumentation CDR, 2017.
11. Tan J., Sordet M., Soby L. Beam Position Monitor System for the CERN LINAC4 // Proceedings of DIPAC2011. Hamburg, Germany, 2011. P. 272.
12. Sato S., Miura A., Tomisawa T. et al. Study of J-PARC Linac Beam Position Monitor as Phase Monitor // Proceedings of PAC09. Vancouver: BC, Canada, 2009, TH5RFP061.
13. Tan J., Sordet M., Soby L., Guillot-Vignot F., Gerard D., Ludwig M., Steyaert D. et al. Development of BPMs for the Linac4 // Linac4 Instrumentation Review. Zurich, October 2011.
<https://indico.cern.ch/event/153694/>.

14. Бронштейн И., Фрайман Б. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969.
15. Feschenko V., Ostroumov P.N. Bunch Shape Measuring Technique and Its Application for an Ion Linac Tuning // Proc. of the 1986 Linear Acc. Conf. Stanford, 1986. P. 323.
16. Feschenko A.V., Ostroumov P.N. Bunch Shape Measurements at the INR Linac // Proc. of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation. KEK, Tsukuba, Japan, April 22–24, 1991. P. 236.
17. Feschenko A. Methods and Instrumentation for Bunch Shape Measurements // Proc. of PAC2001. Chicago, IL, USA, June 18–22, 2001. P. 517.
18. Gavrilov S., Feschenko A., Chermoshentsev D. // J. Instrumentation, 2017. V. 12. P. 12014.
<https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12014>
19. Sieber T., Forck P., Barth W., Dziuba F., Feschenko A., Gavrilov S., Heilmann M., Kuerzeder T., Miski-Oglu M., Reeg H., Reiter A., Yaramyshev S. Bunch Shape Measurements at the GSI CW-linac Prototype // Proceedings of IPAC2018. Vancouver, Canada, 2018. P. 2091.
<https://www.doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPAC006>
20. ARIES workshops. Experiences during Hadron Linac Commissioning, 2021.
<https://agenda.ciemat.es/event/1229/>

Concept of Beam Instrumentation System for High-Intensity DARIA Proton Linac

S. A. Gavrilov^{1, 2, *}, A. I. Titov^{1, 2}

¹*Institute for Nuclear Research Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141700 Russia*

**e-mail: s.gavrilov@inr.ru*

Beam diagnostics is one of the main tasks during operation of charged particle accelerators. The paper presents a concept of a beam instrumentation system that provides diagnostic procedures and allows to measure and adjust the beam parameters in a linear resonant proton accelerator of a compact neutron source DARIA: current, position, profile, emittance, energy, phase characteristics. An important requirement is to provide measurements during the accelerator tuning procedure, when the beam parameters can be changed in a wide range. It is proposed to include in the main structure of the system such types of diagnostic devices as beam current transformers, stripline beam position monitors, wire scanners, ionization beam cross-section monitor, slit emittance meter, bunch shape monitor, water-cooled Faraday cup. A particular attention is paid to a non-destructive method due to a high pulse and average beam intensity in conjunction with a relatively low beam energy to provide continuous operational control of the beam parameters. Main physical principles of operation, typical characteristics, as well as features of the practical implementation of the devices are included. A possible arrangement layout of diagnostic units along the accelerator is proposed, taking into account peculiarities of using the proposed types of detectors in various parts of the accelerator.

Keywords: proton linear accelerator, beam instrumentation system, beam current transformer, Faraday cup, wire scanner, beam cross-section monitor, emittance monitor, beam position monitor, bunch shape monitor.