

## МОНИТОРЫ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА УСТАНОВКИ ФОДС

© 2012 г. А. А. Волков, В. П. Ефремов, Н. С. Иванова, А. Ю. Калинин,  
А. В. Кораблёв, А. В. Кошелев, А. Н. Криницын, В. И. Крышкин, Н. В. Кулагин,  
А. Ф. Лукьянцев, С. В. Маконин, А. А. Матюшин, В. П. Милюткин, Ю. А. Мишагин,  
В. С. Селезнев, В. В. Скворцов, А. Ю. Сотников, В. В. Талов, Л. К. Турчанович

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

Поступила в редакцию 28.07.2011 г.

Для измерения интенсивности и контроля качества пучка установки ФОДС разработана система мониторинга, включающая ионизационные и сцинтилляционные мониторы. Система рассчитана на работу с интенсивностью пучка от  $10^4$  до  $10^9$  частиц/с. Приводятся характеристики элементов системы.

### ВВЕДЕНИЕ

Установка ФОДС (фокусирующий двухплечевой спектрометр) [1] создана для измерения редких процессов, что требует предельной светимости. Поэтому интенсивность падающего пучка канала № 22 [2] ограничивается только величиной, при которой эффективность реконструкции траектории частиц в дрейфовых камерах начинает падать. Это происходит при загрузке камер около  $3 \cdot 10^6$  частиц/с, что соответствует интенсивности пучка  $5 \cdot 10^8$  частиц/с для ядерных мишеней толщиной  $\sim 0.1$  ядерной длины взаимодействия. Такую интенсивность можно измерять только относительноными мониторами, которые требуют калибровки. Для измерения интенсивности и пространственного распределения пучка были созданы ионизационные камеры [3]. Существовавшая ранее на установке ФОДС система диагностики [4] к 2008 году физически устарела и требовала модернизации, важной частью которой являлось создание новых модулей аналоговой электроники. Эти модули должны были быть интегрированы в существующую систему автоматизированной диагностики каналов выведенных пучков ИФВЭ [5], которая эксплуатируется с 2002 г.

Для калибровки ионизационных камер и контроля временных характеристик пучка создана система сцинтилляционных счетчиков.

В данной работе представлены структура системы мониторинга и ее отдельные элементы, описывается процедура калибровки, контроля качества пучка и приводятся характеристики элементов системы.

### 1. СИСТЕМА МОНИТОРИРОВАНИЯ ПУЧКА

Система мониторинга пучка, расположенная перед анализирующим магнитом ФОДС, показана на рис. 1. Состав пучка – примесь пионов в поляризованном пучке протонов. Выделение электронов контролируется пороговыми черенковскими счетчиками  $\check{C}_i$ . Интенсивность пучка и его положение в пространстве измеряются ионизационными камерами  $IC_i$  и сцинтилляционными годоскопами  $H_i$ . Набор сцинтилляционных счетчиков используется для абсолютной калибровки мониторов, относительного мониторинга и контроля качества пучка.

### 2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МОНИТОРЫ

Первым по пучку установлен счетчик  $SB$  со сцинтиллятором  $\varnothing 180$  и толщиной 10 мм, просматриваемый фотоэлектронным умножителем (ф.э.у.) ХР 2020. Толщина сцинтиллятора диктуется допустимым максимальным счетом сцинтилляционного телескопа  $F$ , для которого счетчик  $SB$  является мишенью. Высоковольтный делитель ф.э.у., использующий для стабилизации усиления фотоумножителя схему со стабилитронами, обеспечивает, как показали стендовые испытания, линейность усиления вплоть до потоков частиц  $2 \cdot 10^6$  с $^{-1}$ .

Сцинтилляционный телескоп  $F$ , состоящий из 3 счетчиков, направлен на счетчик  $SB$ . Интенсивность счета этого телескопа (совпадения 3 счетчиков на ФЭУ-85) составляет  $\sim 10^{-3}$  от интенсивности пучка.

Над счетчиком  $F_1$  установлен счетчик  $F'_1$ , имеющий такие же геометрические размеры сцинтиллятора. Эти счетчики включены в совпадения,

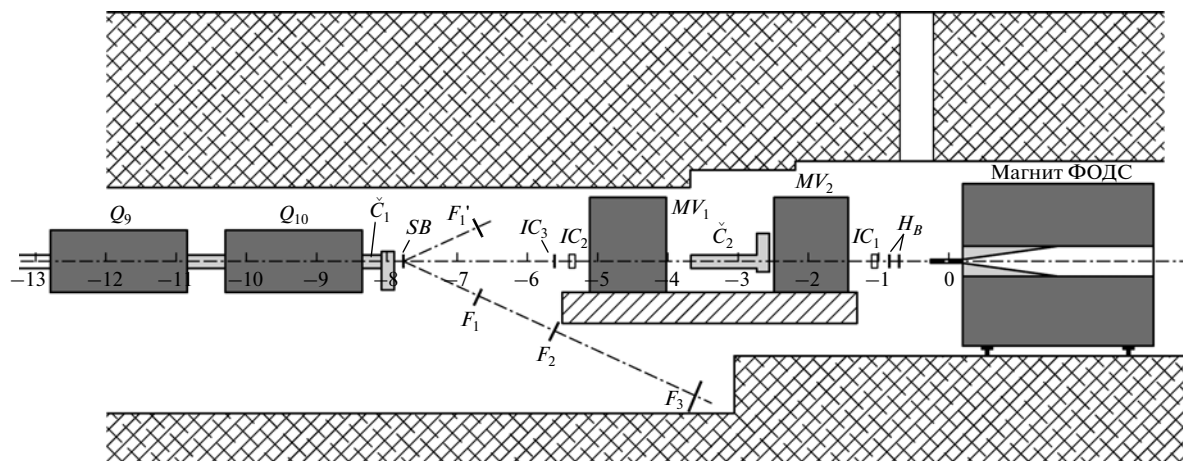


Рис. 1. Система мониторинга пучка, установленная на канале № 22 перед ФОДС.  $Q_i$  – квадрупольные линзы;  $MV_i$  – отклоняющие в вертикальной плоскости магниты;  $\check{C}_i$  – черенковские пороговые счетчики;  $IC_i$  – ионизационные камеры;  $H_B$  – сцинтилляционные годоскопы;  $SB$  и  $F_i$  – сцинтилляционные счетчики.

причем в один из счетчиков введена задержка времени для исключения истинных совпадений.

Для контроля работы мониторов на всех сцинтилляторах счетчиков установлены ультрафиолетовые светодиоды, на которые подаются сигналы с генератора перед каждым циклом интенсивности ускорителя.

Схема для регистрации информации со сцинтилляционных мониторов представлена на рис. 2. Сигналы с фотоумножителей поступают на формирователи  $\Phi$ , затем на схемы совпадений  $И$  и после них на счетчики 1–5.

Информация со сцинтилляционных счетчиков  $F_1$  и  $F_1'$  используется для оценки равномерности распределения интенсивности пучка в течение сброса по отношению

$$T = [2\tau(n_1/t)(n_2/t)]/(n/t),$$

где  $n$  – число случайных совпадений счетчиков  $F_1$  и  $F_1'$  (число отсчетов счетчика 3, рис. 2);  $\tau$  – разрешающее время схемы совпадений;  $n_1$  и  $n_2$  – число отсчетов счетчиков 2 и 4;  $t$  – длительность цикла ускорителя. В идеальном случае это отношение равно 1. Измерения показали, что отношение числа триггеров к показаниям ионизационного монитора интенсивности не меняется вплоть до величины  $T = 0.5$ . Поэтому только при  $T < 0.5$  начинается диалог со службами ускорителя и вывода пучка.

### 3. ИОНИЗАЦИОННЫЕ МОНИТОРЫ

Ионизационные камеры работают на воздухе в интегральном режиме, т.е. регистрируют суммарный сигнал за все время вывода пучка.

Система сбора и обработки информации о пучке [6] базируется на свободно распространяемом

программном инструментарии EPICS [7] и имеет многоуровневую организацию. На нижнем уровне системы находятся каркасы предварительной (аналоговой) электроники. На среднем уровне – кейт VME, в котором размещаются контроллер mve-167 (с операционной системой vxWorks [8]), модуль управления VTG и модули аналого-цифровых преобразователей (а.ц.п.) [9]. Далее кейт вместе с содержащейся в нем аппаратурой

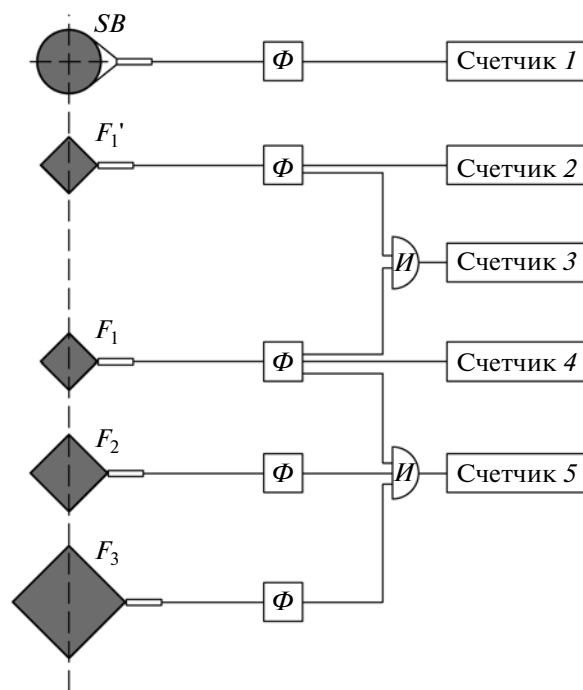
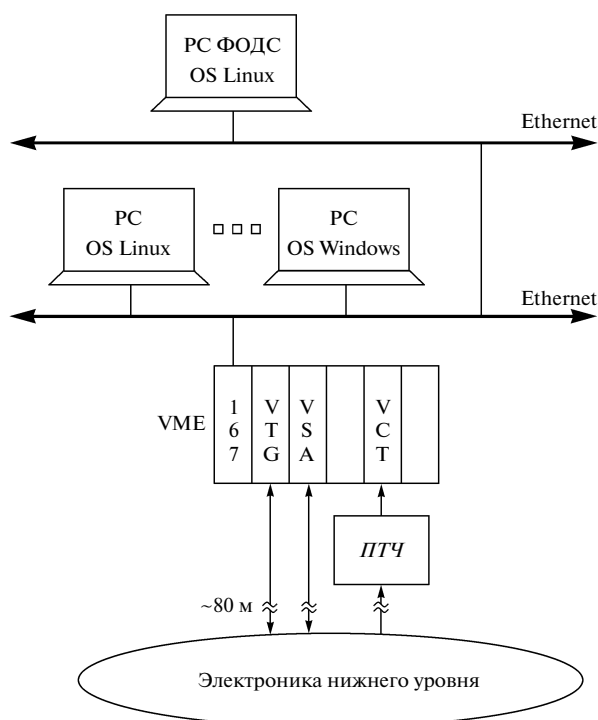


Рис. 2. Схема для регистрации информации со сцинтилляционных мониторов.  $\Phi$  – формирователь,  $И$  – схема совпадений.



**Рис. 3.** Структура системы диагностики пучка установки ФОДС, где 167 – процессор крейта Motorola 167; VTG – комбинированный таймерный модуль для управления выбором сигналов с профилометров, таймирования запуска многоканальных а.ц.п. и управления режимом интеграторов; VSA – 12-разрядный 16-канальный а.ц.п. для измерения сигналов с профилометров и промежуточного хранения результатов измерения; VCT – 8-канальный блок счетчиков для счета импульсов, поступающих с выхода преобразователя тока в частоту (ПТЧ) системы измерения интенсивности.

Input/Output Controller (ИОС) в терминологии EPICS [10]. На верхнем уровне находятся персональные компьютеры (консоли управления), расположенные в центральной пультовой каналов или на рабочих местах пользователей (рис. 3).

На консолях управления реализованы:

- отображение характеристик пучка и его профиля в графическом виде;
- интерфейсы для настройки режимов работы аналоговой электроники и ИОС;
- архивирование данных и просмотр архива;
- программы передачи данных о пучке в каждом цикле ускорителя на сервер автоматизации (для ее распространения потребителям);
- программа подготовки и передачи информации с измерителя интенсивности  $IC_3$ , профилометров  $IC_1$  и  $IC_2$  (рис. 1) на пультовую установки ФОДС.

Следует отметить, что сбор и первичная обработка информации о профилях и интенсивности

пучка в каждом цикле протонного синхротрона У-70 реализованы, в основном, на уровне ИОС.

### 3.1. Измерение профилей

Нижний уровень электроники (рис. 4) собран на стандартных в ИФВЭ каркасах [11], что позволило включить оба профилометра в имеющуюся в канале систему магистральных кабелей для измерения профилей. Отличительной особенностью данных многоканальных ионизационных камер является увеличенное количество каналов (по сравнению со стандартными камерами [12]), а также разные ширина и шаг групп электродов в обеих плоскостях, что привело к необходимости использования дополнительных каркасов накамерной электроники и изменения алгоритмов обработки информации на среднем уровне.

Профилометры установки ФОДС имеют в каждой плоскости по сорок информационных каналов с различными шагами. Структура и размер шагов одной из плоскостей приведены на рис. 5.

Основным модулем предварительной электроники является 8-канальный блок интеграторов I-8. В каждом каркасе находится по 4 таких устройства, обеспечивая 32 канала измерения профиля пучка.

Модуль выполнен на основе прецизионной микросхемы IVC102, обладающей малыми токами утечки и имеющей встроенные интегрирующие конденсаторы (10, 30 и 60 пФ) для регулирования коэффициентов усиления. Для расширения диапазона интегрирования на плате установлены внешние конденсаторы большей емкости. Переключение осуществляется оператором дистанционно из пультовой канала выставлением соответствующего режима через интерфейс программы отображения информации. Выбором определенных номиналов интегрирующих конденсаторов можно добиться желаемых коэффициентов усиления и их соотношений для широкого спектра входных токов.

С выходов интеграторов сигналы по кроссу каркаса поступают на 32-канальный аналоговый коммутатор АК-32 и далее по коаксиальному кабелю передается на вход а.ц.п., находящегося в крейте VME в пультовой каналов.

### 3.2. Измерение интенсивности

Как уже указывалось выше, датчик интенсивности представляет собой ионизационную камеру общего потока. Сигнал с нее по коаксиальному кабелю передается на вход преобразователя тока в частоту (ПТЧ), находящегося в каркасе на пультовой каналов (рис. 3 и 6).

Преобразователь выполнен по схеме интегратора (ОРА 627) с компенсированным зарядом. Разряд конденсатора осуществляется фиксированным эталонным током. Сигнал с выхода интегратора посту-

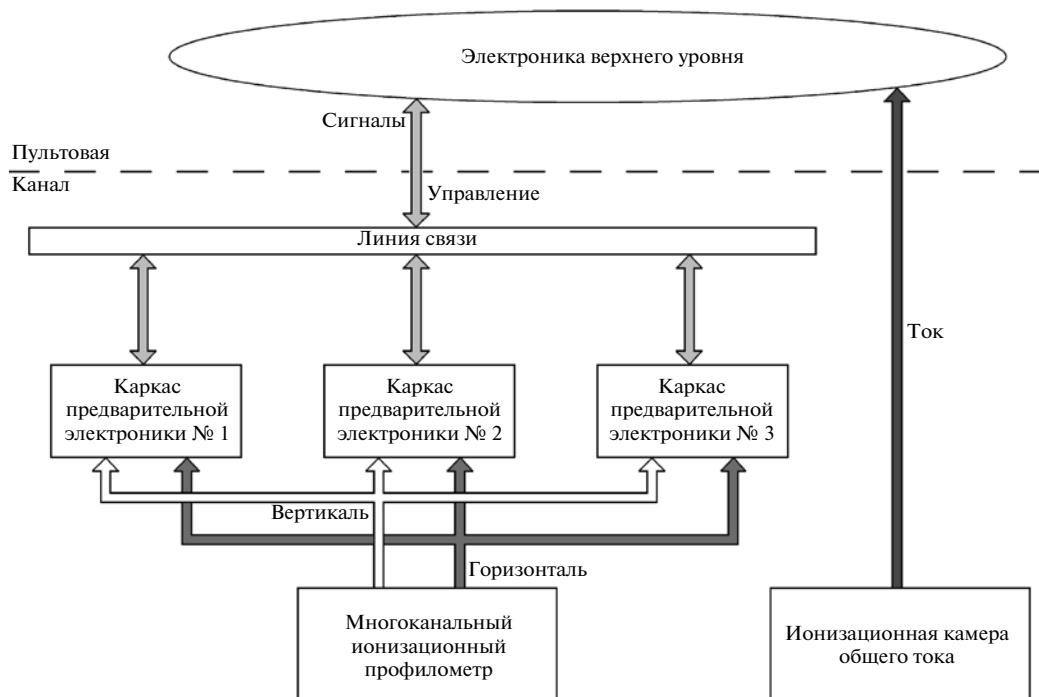


Рис. 4. Структурная схема электроники нижнего уровня системы диагностики.

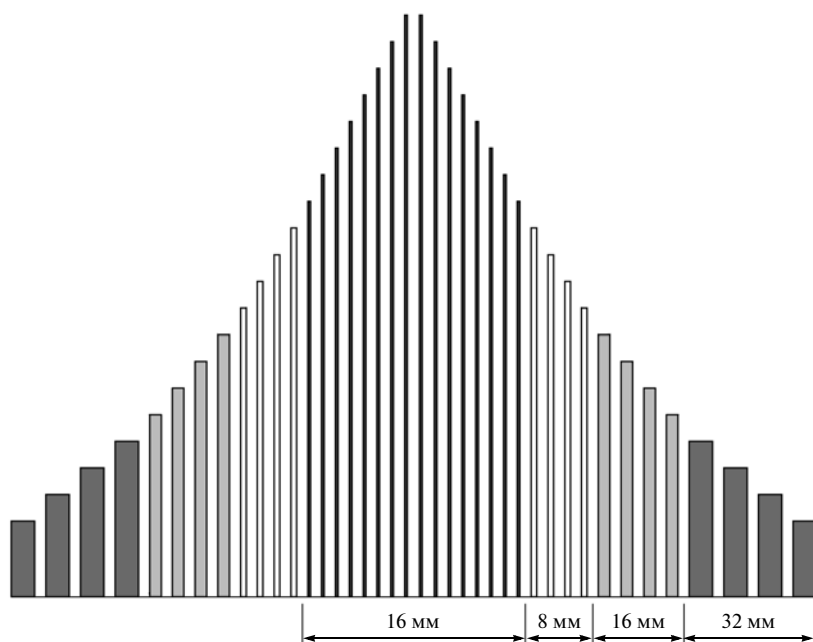


Рис. 5. Условное изображение измерительной плоскости профилометров ФОДС.

пает на компаратор (NE521), который сравнивает входное напряжение с опорным и при достижении порогового уровня  $V_n$  запускает мультивибратор. Выходные импульсы мультивибратора управляют ключом, замыкающим источник эталонного тока на

вход интегратора. Они же являются выходным сигналом преобразователя, эквивалентным входному току.

Преобразователь ток–частота работает в широком диапазоне (100 пкА–300 мкА) входных токов.

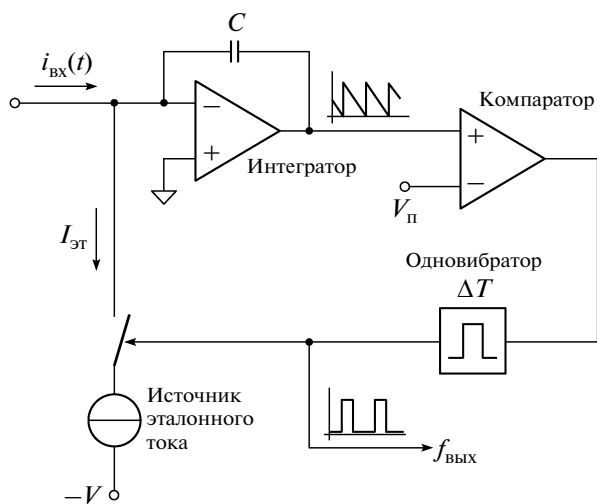


Рис. 6. Схема преобразователя тока в частоту.

Линейность преобразования тока в частоту (в области малых токов — с 5 нА) иллюстрирует рис. 7. Импульсы ПТЧ подаются на 16-разрядный счетчик с максимальной скоростью счета 8 МГц.

### 3.3. Отображение информации

Для решения задач сбора данных с профилометров ФОДС и их обработки, представления данных на консольных компьютерах и передачи данных на установку ФОДС программное обеспечение системы диагностики [6] было дополнено рядом процедур.

В отличие от стандартной схемы, где каждая камера-профилометр соединяется с модулями а.ц.п. посредством одного каркаса, каждая нестандартная камера соединяется с модулями а.ц.п. с помощью трех таких каркасов. Поскольку номера каркасов и каналов подключения могут меняться, в программном обеспечении ИОС сформирована таблица их соответствия.

Для осуществления настройки и управления пучком операторам консоли требуются различные режимы (точности) отображения информации: поначалу укрупненная гистограмма профиля пучка, охватывающая большой диапазон, затем более точная и более локализованная. Поэтому были выбраны четыре режима отображения показаний датчиков камер ФОДС — с шагами 8, 4, 2 и 1 мм. Для каждого режима вычисляются суммарный заряд по каждой плоскости камеры (вертикальной и горизонтальной), смещение центра тяжести пучка, среднееквадратическое отклонение от центра пучка.

В системе диагностики собранная, упорядоченная и предварительно обработанная в ИОС информация поступает на консольный компьютер для

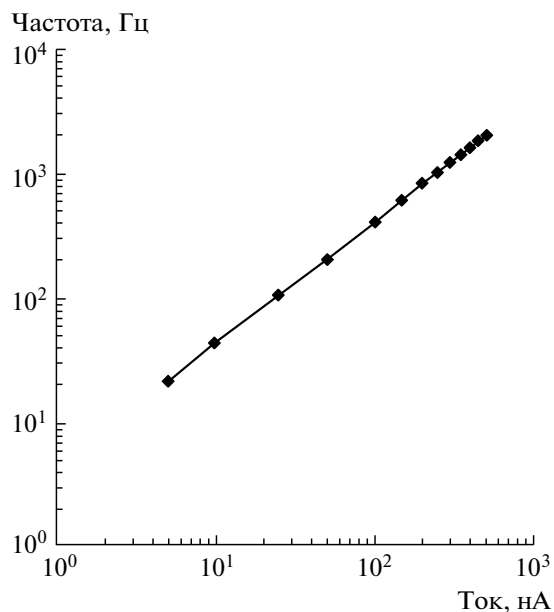


Рис. 7. Зависимость частоты выходных импульсов от входного тока.

визуализации средствами EPICS. Для четырех режимов отображения гистограмм профилей пучка в канале установки ФОДС был разработан программный модуль, в котором обрабатываются массивы данных, подготовленные на среднем уровне. Оператору на консоли предоставляется меню, в котором он может выбирать режимы отображения по своему усмотрению. На экране допускается наличие всех 4 режимов или меньшего их количества, при этом на дисплей выводятся две гистограммы (горизонталь и вертикаль). Кроме гистограмм отображаются характеристики пучка и величина интенсивности, измеренная датчиком интенсивности. В настроенном режиме инженер-оператор обычно использует лишь 16 центральных каналов плоскости с шагом 1 мм. На рис. 8 представлены профили пучка перед мишенью ФОДС, снятые с различными шагами.

### 3.4. Передача данных на установку ФОДС

Основные измеренные и вычисленные данные о пучке в каждом цикле ускорителя передаются из ИОС на консольный компьютер. Для передачи информации на ФОДС была написана программа, которая функционирует на верхнем уровне (на консоли) и является сетевым клиентом. Ее партнером служит программа-сервер, работающая на компьютере ФОДС. После очередного вывода пучка программа-клиент ожидает информацию из ИОС. В ИОС происходит чтение данных от аппаратуры в момент прохождения пучка, затем задержка во времени, после которой снима-

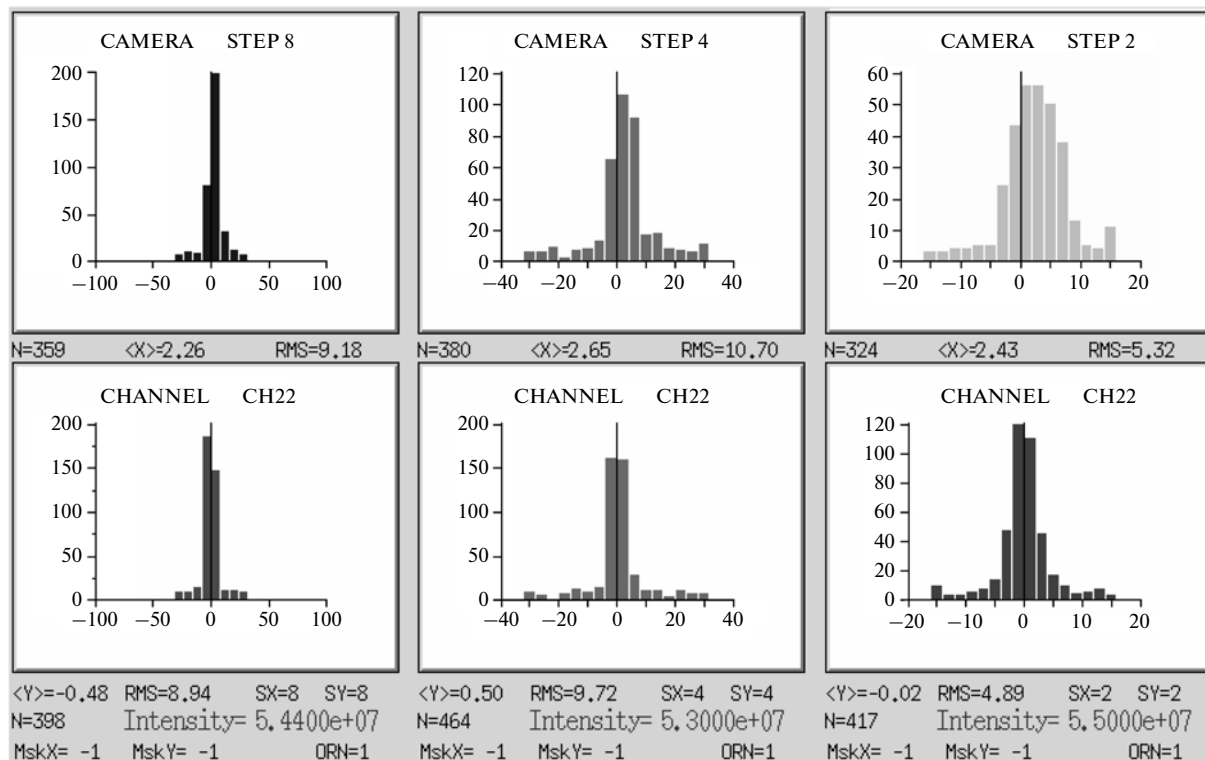


Рис. 8. Профили пучка на детекторе  $IC_1$  с шагом 8, 4 и 2 мм.

ются показания датчиков в отсутствие пучка — чтение пьедесталов. Полученная информация предварительно обрабатывается в ИОС: вычитаются пьедесталы, учитываются ориентация и полярность, выполняется преобразование форматов и пр. Время чтения данных (равное времени чтения пьедесталов) и время задержки устанавливает инженер-оператор канала вывода. В последнем сеансе эти величины были равны 2 и 1.5 с соответственно. Таким образом, приблизительно через 5–6 с после вывода пучка программа, работающая на консоли, получает информацию от ИОС, формирует пакет данных, устанавливает соединение по сети с компьютером ФОДС и посылает пакет.

Программа на компьютере ФОДС после вывода пучка читает данные со счетчиков каркаса СУММА о мониторах и триггерах, что занимает около секунды. После этого она в качестве сетевого сервера разрешает клиенту выполнить входящее соединение. После получения данных происходит запись информации на жесткий диск. По завершении передачи клиент и сервер закрывают соединение и входят в режим ожидания нового цикла ускорителя. Передаваемые данные содержат номер цикла ускорителя (отсчет идет от условного нуля, который устанавливается при загрузке ИОС), значение и коэффициент интенсив-

ности, коэффициенты усиления (параметры электроники), массивы измеренных показаний датчиков ионизационных камер для горизонтальной и вертикальной плоскостей. При проблемах с получением данных от ИОС выставляется специальный флаг (номер цикла равен -1).

#### 4. КАЛИБРОВКА МОНИТОРОВ

Калибровка относительного монитора интенсивности (ионизационная камера  $IC_3$ ) проводится по сцинтилляционному счетчику  $SB$ , перекрывающему весь пучок, при изменении интенсивности падающего пучка в диапазоне  $10^4$ – $10^7$  частиц/с. На рис. 9 приведен пример такой калибровки — зависимость показаний ионизационного монитора интенсивности  $IM$  от счета  $SB$ . По определению, ионизационный монитор является линейным во всем диапазоне интенсивности (до  $10^9$  частиц/с) и по нему определяется диапазон линейности, прежде всего, счетчика  $SB$ . В этом диапазоне по показаниям счетчика  $SB$  определяются калибровочные коэффициенты относительных мониторов. Точность определения калибровочных коэффициентов лучше процента. Точность мониторинга определяется долговременной стабильностью мониторов — зависимостью от температуры, давления воздуха и т.д. — и оценивается в 20%.

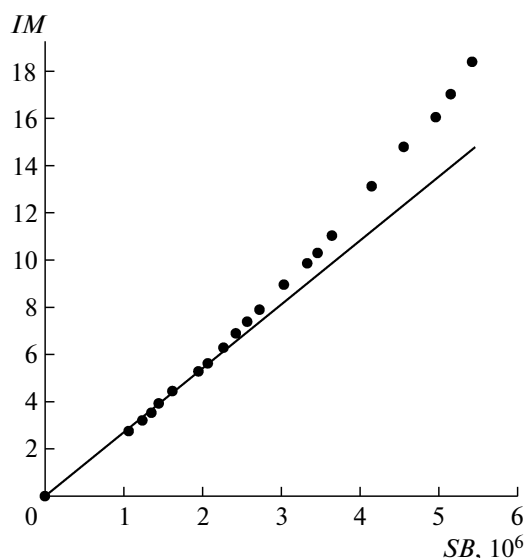


Рис. 9. Зависимость показаний ионизационного монитора  $IM$  от счета пучкового сцинтилляционного счетчика  $SB$ .

Важнейшими параметрами, определяющими качество экспозиции, являются:

- равномерность интенсивности пучка во времени;
- показания относительных мониторов;
- отношение числа инклюзивных триггеров в каждом плече к ионизационному монитору;
- распределение интенсивности пучка на мишени установки по горизонтали и вертикали.

После каждого цикла вывода пучка с ускорителя все эти величины отображаются на мониторе установки ФОДС, как показано на рис. 10.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система мониторинга позволяет оперативно контролировать интенсивность пучка в диапазоне  $10^4$ – $10^9$  частиц/с, качество пучка – пространственные характеристики и равномерность интенсивности в течение цикла, а также глобальные характеристики установки.

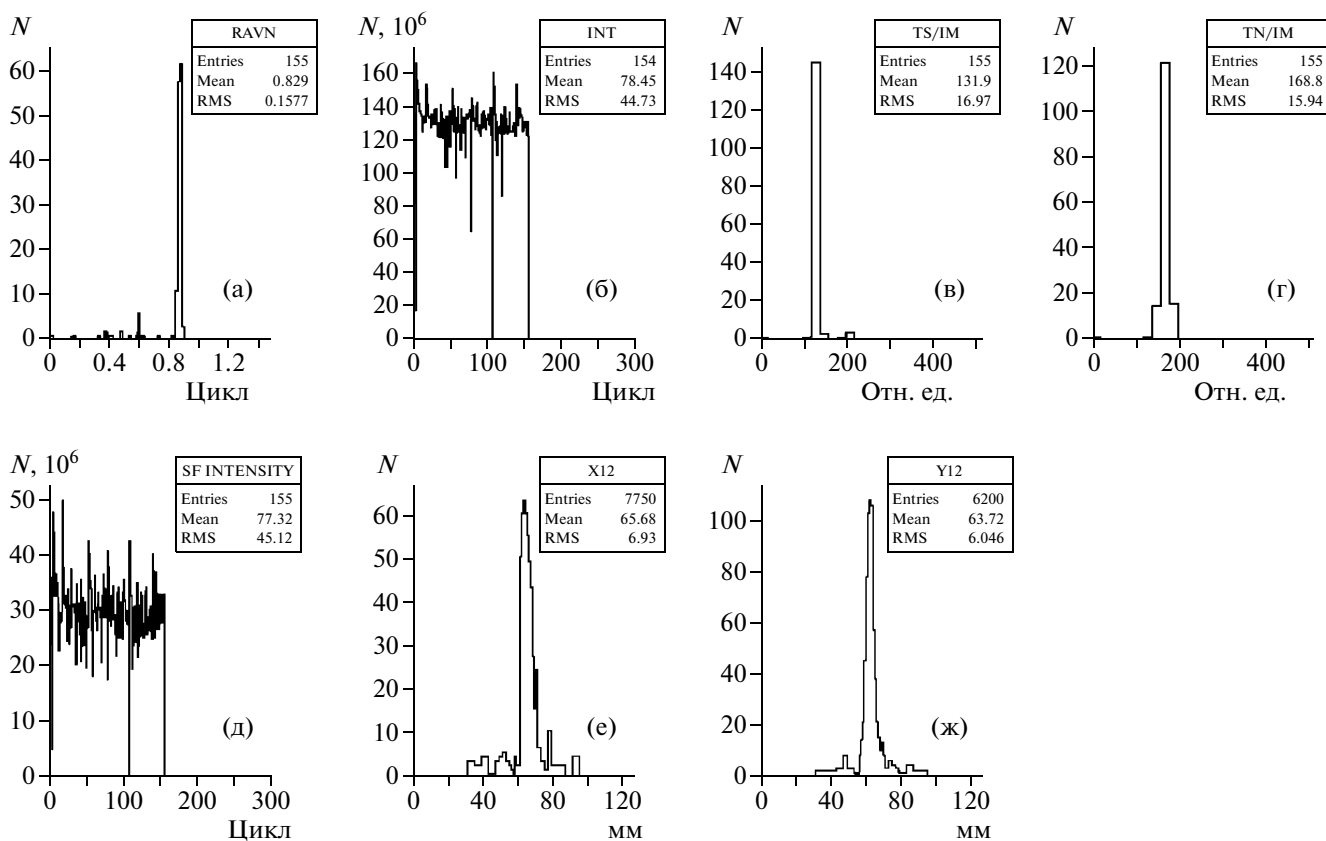


Рис. 10. а – эффективная растяжка пучка; б – интенсивность пучка в текущем сбросе по показаниям ионизационного монитора; в, г – отношение числа триггеров в плечах спектрометра (южном и северном) к показаниям ионизационного монитора; д – распределение показаний относительных мониторов интенсивности пучка; е, ж – распределение пучка протонов на мишени ФОДС соответственно по горизонтали и вертикали.  $N$  – число прошедших циклов (а, в, г); относительная величина интенсивности пучка (б, д); количество частиц (в отн. ед.), прошедших через соответствующие каналы профилометров (е, ж).

Работа была проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.518.11.7005 от 12 мая 2011 г.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов В.В., Алексеев А.В., Балдин Б.Ю. и др.* // ПТЭ. 1992. № 6. С. 75.
2. *Афонин А.Г., Галяев Н.А., Гресь В.Н. и др.* Препринт ИФВЭ 90-38. Протвино, 1990.
3. *Вражнов Ю.Н., Дышкант А.С.* // ПТЭ. 1982. № 25. С. 69.
4. *Дышкант А.С., Суляев Р.М.* // ПТЭ. 1984. № 3. С. 23.
5. *Иванова Н.С., Ковальцов В.И., Кошелев А.В. и др.* // Труды XVIII Совещания по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2002. Обнинск, 1–4 октября 2002.
6. *Kovaltsov V., Matyushin A., Milyutkin V. et al.* // Proceedings of 8th International Conference ICALEPCS-2001. San Jose, California USA, Oct. 2001; <http://www.slac.stanford.edu/econf/C011127/WEAP005.pdf>; <http://arxiv.org/abs/physics/0111080>
7. <http://www.aps.anl.gov/epics>
8. VxWorks Programmers's Guide/ WindRiver Systems, 1994.
9. *Матюшин А.А.* Препринт ИФВЭ 2002-13. Протвино, 2002.
10. *Anderson J., Kraimer M.* EPICS Input/Output Controller (IOC) Record Reference Manual. Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source, December 1, 1994 – DRAFT APS Release 3.
11. *Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П. и др.* Препринт ИФВЭ 85-61. Серпухов, 1985.
12. *Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Лапицкий С.Н. и др.* // ПТЭ. 1985. № 3. С. 27.