

P13-2005-214

А. В. Барашков, Г. Л. Глonti, А. Л. Гонгадзе,
М. И. Госткин, А. В. Гуськов, Д. В. Дедович,
М. А. Демичев, А. С. Жемчугов, Е. Н. Ильюшенко,
С. А. Котов, Я. В. Королевич, В. Г. Кручонок,
З. В. Крумштейн, Н. К. Кузнецов, Д. Д. Ломидзе,
С. Ю. Подкладкин¹, И. Н. Потрап, Г. Г. Сехниаидзе²,
Д. В. Харченко, Э. Г. Цхададзе, В. Ф. Чепурнов,
Г. А. Шелков

СОВМЕСТНАЯ ПОДВЕСКА И ИНТЕГРАЦИЯ
MDT/RPC-КАМЕР ТИПА VMS/BMF МЮОННОГО
СПЕКТРОМЕТРА ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS

¹ INFN, Лече, Италия

² INFN, Неаполь, Италия

Барашков А. В. и др.

P13-2005-214

Совместная подвеска и интеграция MDT/RPC-камер типа
BMS/BMF мюонного спектрометра эксперимента ATLAS

Описаны системы совместной подвески мюонных BMS/BMF дрейфовых камер с триггерными RPC-камерами для мюонного спектрометра эксперимента ATLAS. Системы подвески предназначены для интеграции камер в единые модули и их последующего позиционирования в экспериментальной установке. Описывается технология интеграции камер. Проводились испытания по наклону модуля на разные углы для изучения прогиба дрейфовой камеры. Измерения велись с помощью оптической системы RASNIK. Было подтверждено нормальное функционирование кинематической подвески. Приведена методика регулировки прогиба лежащих в горизонтальной плоскости BMS/BMF-камер, обеспечивающая минимальную разность между провисанием проволок и корпусов детекторных трубок при постановке модулей в рабочую позицию.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Barashkou A. V. et al.

P13-2005-214

Common Support and Integration of the BMS/BMF Type MDT/RPC
Chambers of the Muon Spectrometer of the ATLAS Experiment

The common support system for muon BMS/BMF drift chambers with trigger RPC chambers for the muon spectrometer of the ATLAS experiment is described. The support systems are intended for the chambers integration into combined modules and for the subsequent installation in the experimental set-up. The technology of chambers integration is described. The sagging of the drift chambers was tested by tilting the modules at different angles. The measurements were performed by means of the RASNIK optical system. The normal operation of kinematic supports was confirmed. We also present the method of the sag regulation for the BMS/BMF chambers lying in the horizontal plane which provides the minimum difference between signal wire and detector tube body sags when the modules are later installed in their working positions.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

В течение 2000–2004 гг. в рамках работ по созданию установки ATLAS [1] в ЛЯП ОИЯИ было изготовлено и испытано около 25 тысяч дрейфовых трубок, собранных в 84 мюонные камеры типа BMS/BMF — одного из шести основных типов MDT-камер [2] центральной (Barrel) части мюонного спектрометра установки ATLAS. Для обеспечения максимально возможного перекрытия апертуры установки (обеспечение требования «герметичности») мюонные камеры каждого типа имеют несколько типоразмеров (в случае BMF/BMS-камер — шесть). Это позволяет максимально плотно заполнить камерами все свободные промежутки вокруг сверхпроводящих обмоток магнитного тороида установки ATLAS.

Координатные детекторы мюонной системы (мюонные камеры) должны обеспечивать точность измерения координаты треков частиц не хуже 80 мкм на всей площади ($\sim 2750 \text{ м}^2$). Для выполнения этих высоких требований для большеразмерных камер с площадью каждой в несколько квадратных метров были разработаны и реализованы технологии массового производства и испытаний как отдельных дрейфовых трубок, так и собираемых на их базе мюонных камер [2, 3].



Рис. 1. *a*) Камера MDT (BMS1C08) на сборочном столе производственного участка ЛЯП ОИЯИ; *б*) момент опускания MDT/RPC-модуля в шахту экспериментальной установки

Как показали контрольные измерения изготовленных в ОИЯИ камер на рентгеновском томографе ЦЕРНа [4], все требования к точности изготовления отдельных дрейфовых трубок и BMS/BMF-камер [6–8] были успешно выполнены. Среднеквадратичное отклонение проволоочки от номинального положения не превысило 20 мкм [5].

Как отмечалось выше, мюонные камеры ATLAS собраны на базе дрейфовых детекторов (трубок), для функционирования которых необходима дополнительная информация о времени прохождения частицы через детектор

(T_0). С этой целью MDT-камеры собираются в единый блок вместе с триггерными RPC-камерами, имеющими достаточно хорошее временное разрешение ($\sim 1,5$ нс). Производство всех RPC-камер для мюонной системы ATLAS осуществлялось в ряде институтов научного объединения INFN (Италия).

Система совместной подвески BMS/BMF- и RPC-камер была разработана в ЛЯП ОИЯИ и произведена в опытном производстве ОИЯИ.

Основные требования, выполненные при разработке:

- обеспечение конфигурации «сэндвича» RPC-MDT-RPC, т.е. каждая MDT-камера с обеих сторон должна прикрываться RPC-камерами;
- обеспечение жесткого соединения RPC-камер между собой;
- обеспечение подвешивания MDT-камеры в составе модуля в трех узлах с сохранением т.н. кинематических свобод подвески (рис. 2);
- возможность доступа к активным элементам камер;
- возможность безопасной транспортировки собранного модуля в транспортной ферме;
- наличие технологии и соответствующих элементов для инсталляции собранных модулей в заданные сектора (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16) центральной (Barrel) части мюонного спектрометра установки ATLAS.

На рис. 2 показана кинематическая подвеска камеры, состоящая из трех независимых опор. Специальные опорные подшипники IGUS со сферической

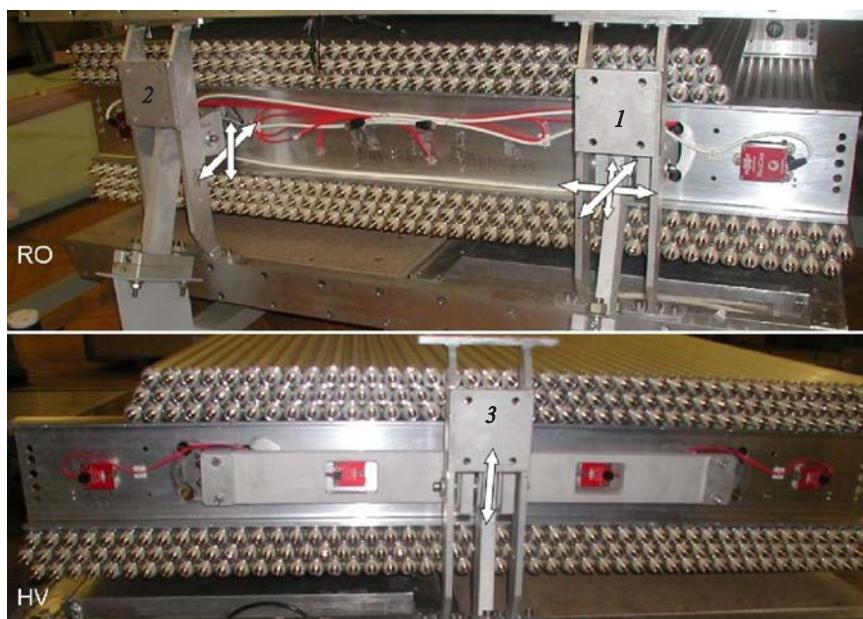


Рис. 2. MDT-камера на кинематической подвеске. Стрелками указаны запрещаемые опорами направления перемещений

внутренней частью, используемые в конструкции подвески, обеспечивают возможность малых поворотов во всех направлениях, а также скольжения вдоль осей. За счет этого во всех трех узлах подвески отсутствуют крутящие моменты, способные непредсказуемо деформировать MDT-камеру.

Опора (1), расположенная на сигнальной стороне MDT-камеры (RO), ограничивает перемещение камеры по трем направлениям, а соседняя опора (2) позволяет за счет скольжения вдоль оси перемещение камеры в поперечном направлении. Опора (3), расположенная на высоковольтной стороне (HV) в середине дополнительной поперечной пластины, шарнирно связывает концы продольных балок спейсера камеры, поддерживает камеру только от перемещения в направлении, перпендикулярном ее плоскости. На рис. 2 все запрещенные опоры перемещения показаны стрелками, общее их количество равно шести, что обеспечивает суть кинематической подвески.

На рис. 3 показана конструкция изготовленных элементов совместной подвески. Элементы для RO- и HV-сторон имеют отличия, но в целом каждая опора состоит из части, крепящейся к MDT-камере, коромысла, крепящегося

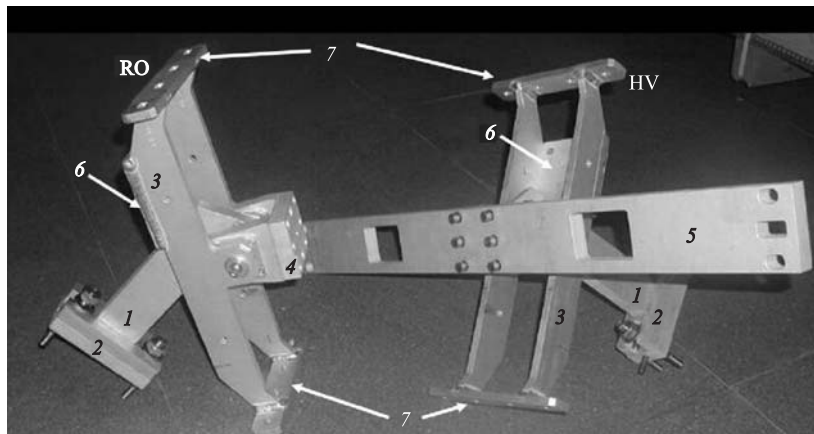


Рис. 3. Элементы совместной подвески MDT/RPC-камер. 1, 2 — детали крепления модуля на рельсе; 3 — коромысло; 4 — блок крепления RO-стороны MDT-камеры; 5 — дополнительная пластина для крепления HV-стороны MDT-камеры; 6 — технологическая пластина для подъема и инсталляции модуля; 7 — места крепления RPC-камер

к RPC-камерам, ножки с площадкой крепления и оси с подшипниками, обеспечивающими соединение частей с необходимыми свободами перемещений. Для фиксации модуля в транспортной ферме и для его подъема при инсталляции в установку на коромыслах приварены платформы (6).

Интеграции в единые модули MDT/RPC-камер проводились в ЦЕРНе после проведения ряда предусмотренных проверок работоспособности MDT- и RPC-камер [7]. Для сборки модулей применялись транспортные фермы, в

которых MDT-камеры доставлялись из ОИЯИ в ЦЕРН. Процесс интеграции происходил в несколько этапов:

- подготовка транспортной фермы (установка опорных ножек, боковых элементов, угловых домкратов);
- установка нижней RPC-камеры на угловые домкраты (рис. 4, *a*);
- подготовка MDT-камеры (установка системы совместной подвески на спейсере);
- установка MDT-камеры на опорные ножки фермы (рис. 4, *b*);
- Свободное соединение нижней RPC-камеры с системой совместной подвески;
- установка и свободное соединение верхней RPC-камеры на совместной подвеске над MDT-камерой (рис. 4, *в*);
- свободное соединение всех деталей транспортной фермы и регулировка взаимного положения;
- жесткая фиксация модуля в транспортной ферме;
- оснастка камер необходимыми оптическими, электронными и кабельными системами;
- тестирование модуля на стенде космических лучей ЦЕРНа;
- регулировка системы прогиба с учетом положения модуля (номера сектора подвески) в экспериментальной установке.

Основная задача описанной кинематической подвески заключается в том, что она должна обеспечивать статически определенное крепление MDT/RPC-камер в заданных секторах с наклоном к горизонтальной плоскости в $22,5^\circ$ (для секторов 4, 6, 12, 14) или $67,5^\circ$ (для секторов 2, 8, 10, 16). При таком креплении форма деформации камеры под действием гравитации или температурных градиентов однозначно определяется. А значит, положения и прогибы отдельных детекторных трубок камеры могут быть определены с высокой точностью с использованием внутренних и внешних оптических систем мониторинга, показания которых будут записываться в базу данных и учитываться при обработке результатов эксперимента.

При установке отдельных модулей, а в дальнейшем и при эксплуатации установки ATLAS допускаются определенные деформации ее силовой структуры за счет гравитации, температурных градиентов и действия магнитного поля. Крепление камер не на кинематических подвесках при этих воздействиях вызвало бы внутренние усилия и непредсказуемые деформации в камерах, а соответственно, потерю точности определения положений и прогибов отдельных детекторных трубок.

Для проверки функциональности системы подвеса были проведены следующие испытания: собранный в транспортной ферме модуль поднимался и опускался за один из краев, на угол до $32,5^\circ$ от горизонтального положения. В процессе подъема и опускания для различных углов наклона записывались

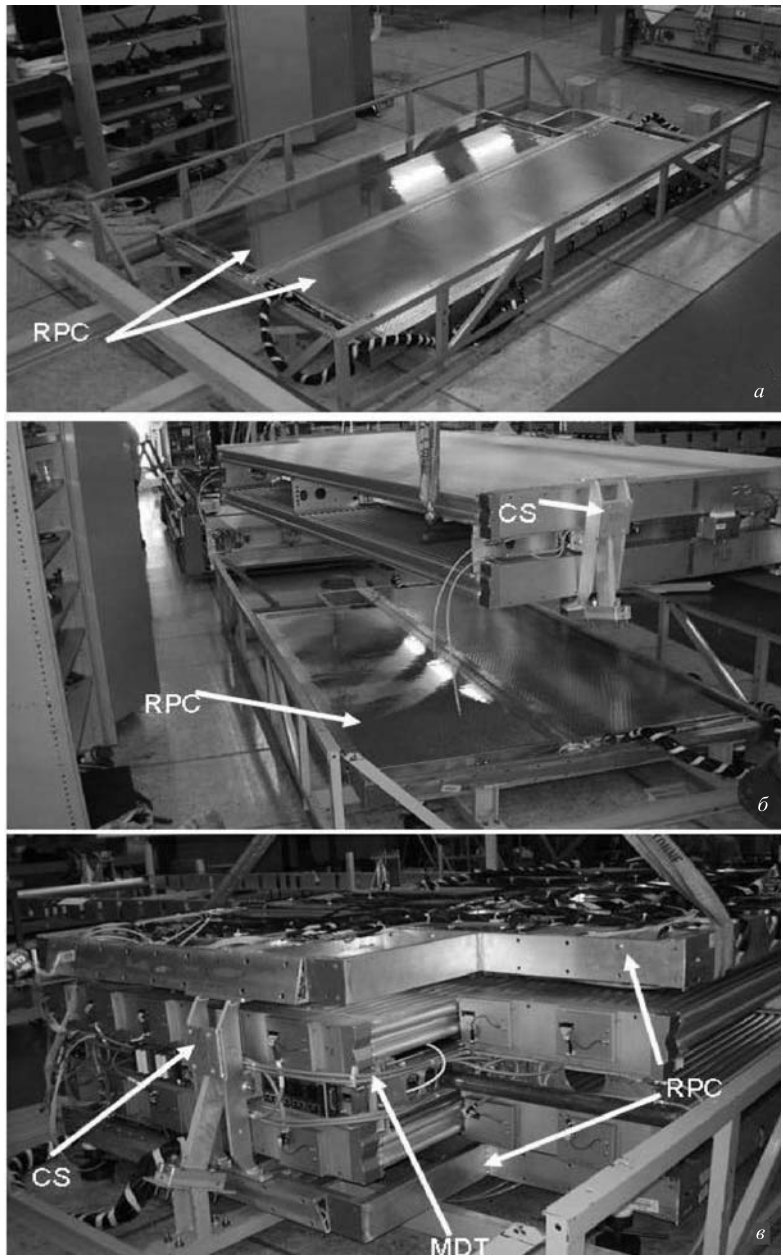


Рис. 4. Этапы процесса интеграции MDT- и RPC-камер в единый модуль

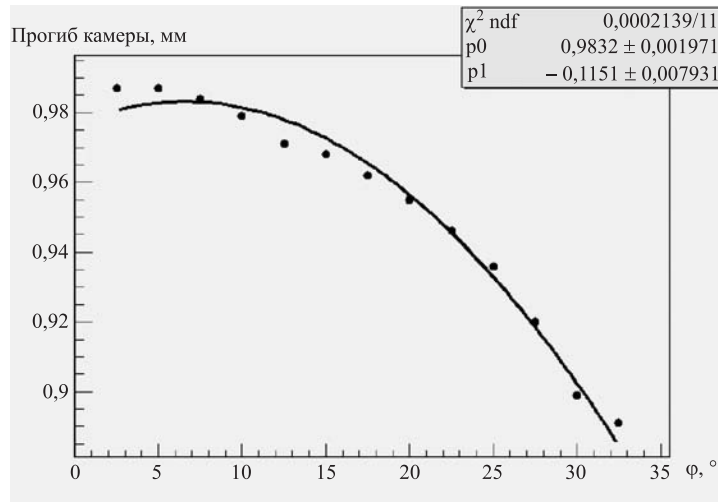


Рис. 5. Диаграмма измерения прогибов камеры при поднимании края на разные углы φ . Сплошная линия — результат аппроксимации

показания внутренней оптической системы RASNIK [10], определяющей деформации камеры. Результаты приведены на рис. 5.

Зависимость прогиба камеры от угла наклона φ хорошо описывается функцией $P_0 \cdot \cos(\varphi + P_1)$. Результат показывает, что влияние системы совместной подвески на деформацию камеры незначительно. Для маленьких углов наклона незначительное расхождение вызвано трением между элементами конструкции подвески. В экспериментальной установке BMS/BMF-камеры имеют наклоны $\pm 22,5$ и $\pm 67,5^\circ$ к горизонту, при которых влияние трения менее существенно.

При сборке каждой камеры на высокоточном сборочном столе сразу после склейки спейсера на нем устанавливалась внутренняя система мониторинга RASNIK, с помощью которой определялись и заносились в базу данных начальные показания — «нулевой прогиб» X_0 . В дальнейшем процессе склейки все последующие измерения сравнивались с X_0 . Для максимального приближения прогиба отдельной детекторной трубки к соответствующему провисанию сигнальной проволоочки на BMS/BMF-камере, устанавливаемой в определенный сектор с заданным углом наклона, проводилась операция регулировки прогиба. Для этого до опускания модуля в шахту ATLAS с помощью специальной системы регулирования прогиба, встроенной в камеру, вводились определенные величины коррекции прогиба детектора (X_{target}), отсчитываемые относительно X_0 .

Прогиб камеры S_m (его максимальное значение посредине детекторных трубок) для угла наклона φ дается соотношением

$$S_m(\varphi) = S_g(\varphi) + S_b, \quad (1)$$

где $S_g(\varphi)$ — гравитационный прогиб камеры, одинаковый для камер одного типа; S_b — неопределенная составляющая прогиба, индивидуальная для каждой камеры и вызванная погрешностями сборки.

При угле наклона φ (например, для BMS-камер из 10-го сектора $\varphi = 67,5^\circ$) гравитационный прогиб меняется по закону косинуса:

$$S_g(\varphi) = S_g(0^0) \cdot \cos \varphi. \quad (2)$$

Так как S_b не зависит от угла наклона, используя уравнения (1) и (2), получаем

$$S_m(\varphi) = S_g(0^0) \cdot \cos \varphi - S_g(0^0) + S_m(0^0),$$

$$S_m(\varphi) = S_g(\varphi) + S_b = -S_g(0^0) \cdot (1 - \cos \varphi) + S_m(0^0).$$

Цель процесса коррекции прогиба состоит в приведении прогиба камеры к прогибу проволочки $S_w(\varphi)$ путем поправки S_{cor}

$$S_m(\varphi) + S_{cor} = S_w(\varphi) S_{cor} = S_w(\varphi) - S_m(\varphi).$$

С косинусоидальной зависимостью прогиба проволочки $S_w(\varphi) = S_w(0^0) \times \cos \varphi$ для любой камеры данного типа мы имеем

$$S_{cor} = S_w(0^0) \cdot \cos \varphi + S_g(0^0) \cdot (1 - \cos \varphi) - S_m(0^0).$$

Если мы измерим S_{cor}^{ref} и $S_m^{ref}(0^0)$ одной референсной камеры путем ее наклона на ϕ , то поправки прогибов для остальных камер данного типа будут

$$S_{cor} = S_{cor}^{ref} + S_m^{ref}(0^0) - S_m(0^0)$$

Таким образом, прогибы, которые необходимо выставить при горизонтальном расположении (0^0) остальных камер такого же типа, выводятся с помощью поправок, полученных по измерениям референсной камеры:

$$S_{t \text{ arg et}}(0^0) = S_m(0^0) + S_{cor} = S_w(\varphi) + S_m^{ref}(0^0) - S_m^{ref}(\varphi). \quad (3)$$

Величина прогиба $S_m(\varphi)$ связана с показаниями $X_m(\varphi)$ системы внутренней юстировки RASNIK следующей зависимостью

$$S_m(\varphi) = \frac{\varepsilon}{2} \cdot [X_m(\varphi) - X_0],$$

где X_0 — «нулевой прогиб» — показание системы на гранитном столе до каких-либо перемещений регулировочных винтов системы регулировки прогиба. Коэффициент ε имеет значения +1 или -1 в зависимости от ориентации элементов оптической системы RASNIK относительно камеры. Тогда формулу (3) можно переписать, подставляя RASNIK-переменные:

$$\varepsilon \cdot [X_{\text{target}}(0^0) - X_0] = 2 \cdot S_w(\varphi) + \varepsilon^{\text{ref}} [X_m^{\text{ref}}(0^0) - X_m^{\text{ref}}(\varphi)].$$

Получаем окончательное выражение для определения поправочной величины для переменных RASNIK-системы:

$$X_{\text{target}}(0^0) = X_0 + 2 \cdot \varepsilon \cdot S_w(\varphi) + \varepsilon \cdot \varepsilon^{\text{ref}} \cdot [X_m^{\text{ref}}(0^0) - X_m^{\text{ref}}(\varphi)] \quad (4)$$

Прогиб проволочки для горизонтально расположенной камеры можно вычислить по формуле $S_w(0^0) = \frac{g}{32 \cdot f^2}$ [8], где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — величина гравитационного ускорения; f — частота собственных колебаний проволочки. Она проверялась на всех собранных детекторных трубках [9] и составляет для BMS/BMF-камер ~ 49 Гц, провисание проволочки, соответственно, ~ 135 мкм.

В таблице для примера приводятся результаты измерения величины X_m RASNIK-системы для двух ее прямых лучей в шести BMS-камерах из сектора А-16. В данном случае референсные измерения проводились на камере BMS3C16.

Тип камеры	ε	X_0 , мм	X_{target} , мм	$X_m(0^0)$, мм	$X(67,5^\circ)$ идеальн., мм	$X_m(67,5^\circ)$ реальн., мм	ΔX
BMS1A16	1	27,964	28,532	28,501	28,056	28,035	-0,021
BMS1A16	-1	27,703	27,137	27,098	27,611	27,557	-0,054
BMS2A16	1	66,289	66,869	66,900	66,381	66,442	0,061
BMS2A16	-1	27,666	27,104	27,051	27,574	27,496	-0,078
BMS3A16	1	47,780	48,354	48,363	47,872	47,887	0,015
BMS3A16	-1	28,205	27,645	27,648	28,113	28,115	0,002
BMS4A16	1	85,215	85,729	85,734	85,307	85,278	-0,029
BMS4A16	-1	66,483	65,953	65,927	66,391	66,381	-0,010
BMS5A16	1	65,210	65,777	65,737	65,302	65,348	0,046
BMS5A16	-1	47,754	47,183	47,204	47,662	47,578	-0,084
BMS6A16	1	28,486	29,054	29,069	28,578	28,625	0,047
BMS6A16	-1	86,068	85,502	85,491	85,976	85,915	-0,061

В последнем столбце таблицы приведены разности величин X между предполагаемыми и реальными прогибами $\Delta X = X(67,5^\circ)_{\text{идеальн.}} - X_m(67,5^\circ)_{\text{реальн.}}$. Видно, что отклонение ΔX от допустимой величины мало и не превышает допустимого 100-мкм предела.

На рис. 1, б показан момент опускания в шахту ATLAS одного из модулей MDT/RPC. В настоящее время все 84 камеры типа BMS/BMF, изготовленные в ОИЯИ, интегрированы с RPC, установлены в установку ATLAS и проводится их рабочее тестирование.

Работа выполнена при поддержке грантов МНТЦ №1659, INTAS-CERN 2000-483 и INTAS-CERN 2003-52-4382.

ЛИТЕРАТУРА

1. Muon Spectrometer Technical Design Report. CERN/LHCC/97-22.
2. *Барашков А. В. и др.* Краткое описание производства BMS/BMF MDT-камер для мюонного спектрометра эксперимента ATLAS. Сообщение ОИЯИ P13-2005-212. Дубна, 2005.
3. *Глонти Г. Л. и др.* Краткое описание производства дрейфовых трубок для MDT-камер эксперимента ATLAS. Сообщение ОИЯИ P13-2001-211. Дубна, 2001.
4. *Gschwendtner E., Rohrbach F., Sedykh Yu.* Analysis and Results from Measurements on an X-ray Tomograph of Large Full-Scale MDT Prototypes. ATL-MUON-98-175; CERN, 28 Jan 1998.
5. http://xtomo.home.cern.ch/xtomo/Results/Dubna/Dubna_2D-Results.html
6. *Kroha H.* Quality Assurance and Control Reference Document for ATLAS MDT Chamber Construction. ATL-MUON-2000-008.
7. *Baretta M. et al.* MDT commissioning procedures. Guidelines for certifying RFI chambers. ATL-MUON-2004-022.
8. *Woudstra M. J., Linde F. L.* Precision of the ATLAS muon spectrometer. CERN-THESIS-2003-015.
9. *Дедович Д. В. и др.* Прибор для измерения натяжения сигнальной проволоки в дрейфовых трубках. Сообщение ОИЯИ P13-2001-201. Дубна, 2001.
10. *van der Graaf H. et al.* RasNiK, an Alignment System for the ATLAS MDT Barrel Muon Chambers. Technical System Description. Amsterdam, April 2000.

Получено 23 декабря 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.03.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,67. Тираж 330 экз. Заказ № 55257.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/