

УДК 539.1.07;539.1.074;

*Я.А. Бердников, А.Я. Бердников, В.А. Евсеев, Н.М. Мифтахов,
В.Н. Никулин, В.М. Самсонов, О.П. Тарасенкова*

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЮОННОГО ПЛЕЧА И ПОДДЕРЖКА ПУЧКОВОЙ ТРУБЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

*Ya.A. Berdnikov¹, A.Ya. Berdnikov¹, V.A. Yevseyev²,
N.M. Miftakhov², V.N. Nikulin², V.M. Samsonov¹, O.P. Tarasenkova²*

¹ St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., Saint-Petersburg, 195251, Russia.

² B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia.

MUON ARM UPGRADE AND BEAMPIPE SUPPORT IN ALICE EXPERIMENT AT LHC

В работе описываются интеграционные аспекты модернизации мюонного спектрометра установки ALICE, в частности поддержка пучковой трубы. Рассмотрены два варианта поддержки. Приведено описание тестового стенда, предназначенного для экспериментальной оценки неопределенностей механической модели. Продемонстрировано разумное описание полученных результатов измерений простой моделью сильфонов.

ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE, МЮОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР, ПОДДЕРЖКА ПУЧКОВОЙ ТРУБЫ, ТЕСТОВЫЙ СТЕНД, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР.

The paper describes the integration aspects of the ALICE Muon Arm upgrade, the beam-pipe support in particular. Two options were considered. The test bench built in order to estimate the uncertainties in the mechanical analysis caused by the bellow model was described. It was also demonstrated that simple model of the bellows gives reasonable description of the results.

ALICE EXPERIMENT, MUON SPECTROMETER, BEAMPIPE SUPPORT, TEST BENCH, LARGE HADRON COLLIDER.

Статья посвящена некоторым аспектам модернизации мюонного спектрометра установки ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [1, 2] на Большом адронном коллайдере (LHC). Мюонные спектрометры предназначены для изучения реакций с образованием мюонов в конечном состоянии, например для изучения выходов мезонов, распадающихся на мюон-антимюонную пару [3, 4]. Выходы различных мезонов являются одним из основных источников информации о состоянии вещества, так как при образовании кварк-глюонной плазмы ожидается существенное подавление ве-

роятности их образования. Исследования мюонных каналов распада дают возможность получать информацию, взаимодополняющую по отношению к другим детекторам, и позволяют судить о состоянии вещества, в котором образовались данные продукты столкновения. Идентификация связанных состояний производится статистически по пикам в спектре инвариантной массы мюонных пар.

Принцип выделения мюонов основан на значительно более высокой, по сравнению с другими частицами, проникающей способности мюонов. Это свойство также

обеспечивает более «чистые» измерения, по сравнению с электронным каналом, где уже небольшие препятствия на пути электрона приводят к рождению ливня, серьезно затрудняющего анализ данных.

Мюонный спектрометр установки ALICE и МФТ

Для выделения мюонов в установке ALICE использован поглотитель сложной структуры длиной более четырех метров, что составляет около десяти адронных длин взаимодействия и обеспечивает надежное выделение мюонов. Мюоны с энергией более 5 ГэВ пройдут сквозь него, лишь слегка изменив свой импульс и направление, в то время как более 99 % заряженных частиц и фотонов задерживаются поглотителем. После поглотителя на установке расположено пять станций трековых камер и дипольный магнит. Последний имеет длину около 5 м, создает магнитное поле до 0,7 Тл (интеграл поля около 3 Тл·м), отклоняющее частицы в вертикальном направлении. Две первые трековые станции расположены до магнита, одна внутри, а последние две — за магнитом. Измерив изгиб траектории частицы в магнитном поле, можно восстановить ее импульс. Для достаточно точного восстановления импульса требуется простран-

ственное разрешение в отклоняющей плоскости около 0,1 мм.

Существенным ограничением имеющегося мюонного плеча установки ALICE является отсутствие информации о треках частиц в области от точки взаимодействия до начала поглотителя. Качественно новую физическую информацию можно получить, если дополнить мюонный спектрометр третьей подсистемой, измеряющей положение вершины распада и угол разлета мюонной пары с высокой точностью: мюонным форвардным трекером (МФТ) [5, 6]. Определение смещения вершины распада относительно основной вершины взаимодействия позволит определить канал рождения тяжелого кваркония.

Кроме того, определение угла разлета мюонов существенно улучшит массовое разрешение легких мезонов. Действительно, при $p_\mu \gg m_\mu$ инвариантная масса димюона может быть записана в виде

$$M_{\mu\mu} = \sqrt{2p_1 p_2 (1 - \cos \Theta)} \approx \sqrt{2p_1 p_2} \Theta^2,$$

где p_1, p_2 — импульсы мюонов, Θ — угол между их направлениями; формула приблизительно верна для малых углов.

При димюонных распадах мезонов малых масс импульсы мюонов сравнительно малы, и многократное рассеяние сильно

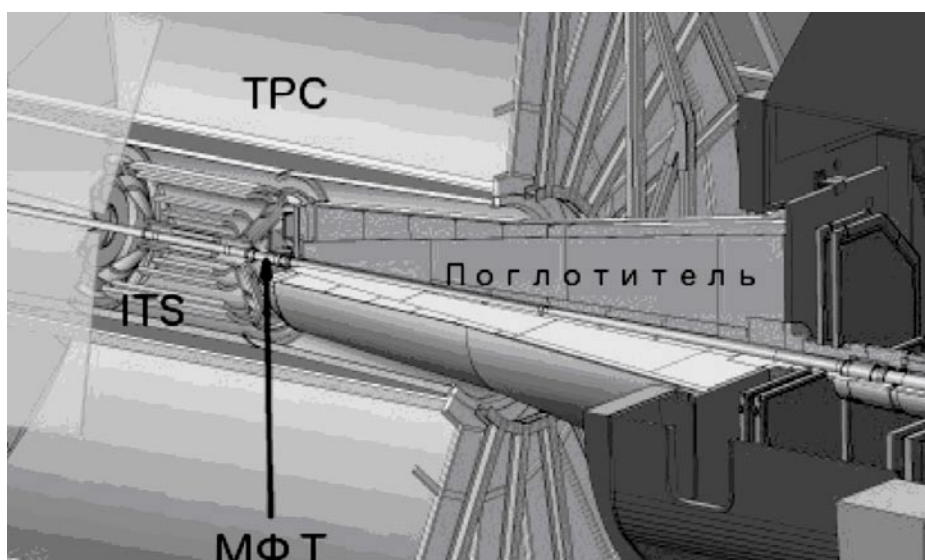


Рис. 1. Местоположение МФТ (на рисунке не показан): между внутренним трекером (ITS) и поглотителем мюонного спектрометра (показан в разрезе) во внутренней полости времяпроекционной камеры (TPC)

искажает направление исходных частиц, восстановленное по информации трековых станций.

Моделирование установки продемонстрировало достаточную эффективность соответствия между треками, зарегистрированными МФТ, и трековыми станциями мюонного спектрометра.

Проектируемая подсистема должна состоять из пяти трековых плоскостей, образованных кремниевыми пиксельными детекторами с размером чувствительного элемента 25 мкм. Плоскости должны располагаться между точкой взаимодействия пучков (IP LHC – Interaction Point LHC) и полностью перекрывать угловой захват спектрометра (от 3° до 9° по полярному углу и 360° по азимуту). Следует отметить весьма ограниченный доступ к будущему детектору (рис. 1): сверху и сбоку расположены корпус времяпроекционной камеры (Time Projection Chamber – TPC) и элементы внутреннего трекера ALICE (Inner Tracker System – ITS), справа – поглотитель мюонного спектрометра.

Поддержка трубы пучка и МФТ

Пучки LHC в области столкновений проходят в специальной трубе, изготовленной из бериллия и установленной вблизи

точки столкновений. Во время модернизации ALICE планируется уменьшить диаметр этой трубы с 58 до 36 мм. При этом зазор между трубой и центральным слоем ITS предполагается довести до 2 мм. Это означает, что допустимые отклонения от номинального положения трубы должны быть не более 1 мм. Труба крепится с двух концов на фланцах. Один конец трубы закреплен на пучковой трубе LHC и неподвижен, в то время как другой расположен на носовой части поглотителя мюонного спектрометра, который может менять свое положение по вертикали и горизонтали в пределах ± 10 мм от оси пучка в зависимости от магнитного поля, температуры и других факторов. Для компенсации этих движений в трубу добавлена сильфонная группа, состоящая из двух алюминиевых сильфонов, параметры которых [7] приведены в первом столбце табл. 1.

Для стабилизации положения трубы необходимо поместить ее крепление между внутренними слоями ITS и сильфонной группой. Задача осложняется тем, что эту область перекрывают выступающие внешние слои ITS.

Предполагается, что МФТ должен вдвигаться в тоннель TPC по специальным направляющим вплоть до установки на свое

Таблица 1

Характеристики сильфонов, поставляемых разными фирмами

Характеристика	Величина, предоставляемая фирмой-изготовителем			
	CERN (I)	Саранский приборный завод (II)	Apel Bellows (Россия) (III)	Skodock Verwaltungs und Vertriebs GmbH (Германия) (IV)
Материал (марка)	Алюминиевый сплав (AA5803)	Латунь (Л80)	Нержавеющая сталь AISI 321 (X18H10T)	Нержавеющая сталь (SK12112012) (AISI 316L)
Толщина стенки, мм	0,30		0,15	
Диаметр внешний, мм	53,3	50,0	50,0	52,0
Диаметр внутренний, мм	34,2	34,4	36,0	36,0
Общая длина, мм	38,0	41,8	40,0	38,0
Шаг гофра, мм	2,533	2,200	2,350	2,235
Число гофров	9			8

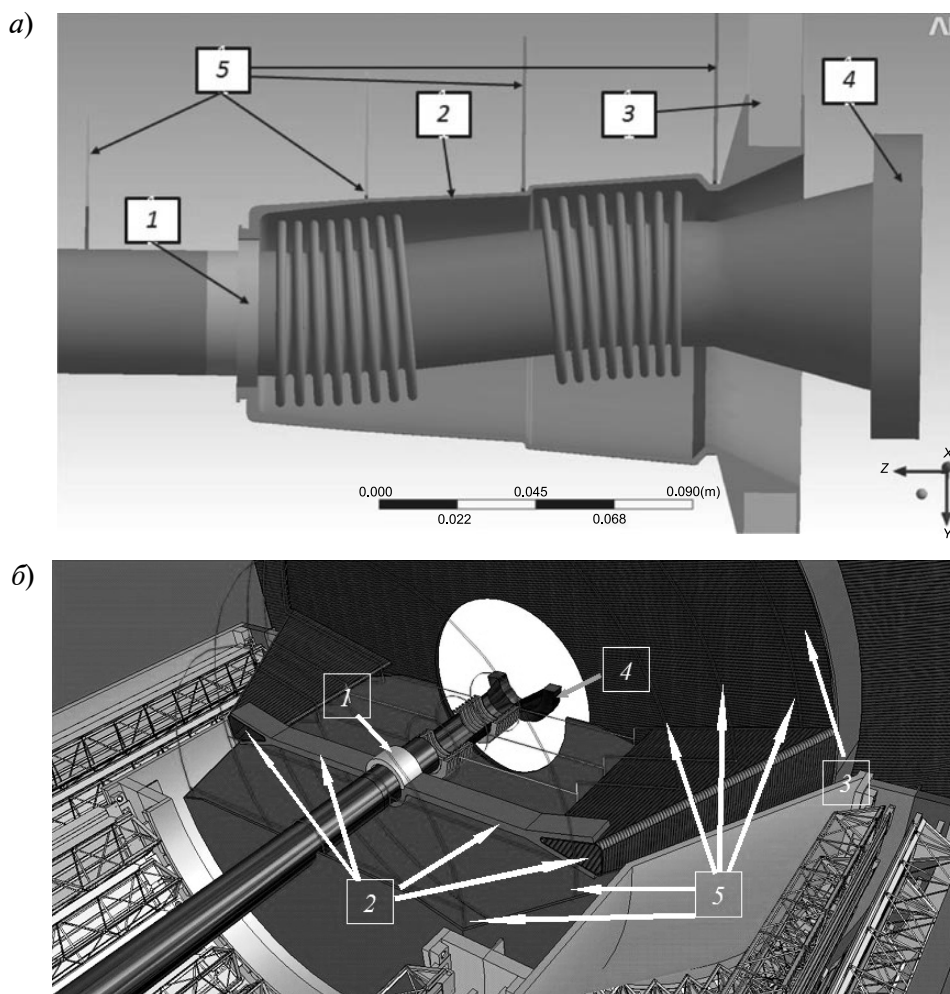


Рис. 2. Две концепции системы поддержки трубы. Цифрами обозначены: 1 – опорное кольцо, 2 – система поддержки, 3 – опорная панель, 4 – фланец трубы поглотителя 5 – камеры МФТ

место, а затем будет вводиться ITS. Такой сценарий позволит обеспечить доступ к детектору во время коротких перерывов (длительностью 1 – 2 месяца), то есть без извлечения ТРС. В настоящее время пучковая труба крепится к детектору FMD, на месте которого будет расположен МФТ, однако такой способ крепления не позволяет осуществлять перемещения детектора из-за опасности повреждения трубы. Поэтому было предложено крепить систему поддержки трубы на опорную панель, установленную в полости ТРС в промежутке между окончанием ITS и началом поглотителя мюонного спектрометра.

Один из предложенных вариантов крепления пучковой трубы представлен на

рис. 2, а. На упомянутой выше опорной панели установлен конус, изготовленный из бериллия, заканчивающийся опорным кольцом. Бериллий был выбран как материал, обладающий, с одной стороны, малыми плотностью и атомным весом, с другой, – уникальными прочностными характеристиками, что позволяет сделать конус тонким, сводя к минимуму вторичные рассеяния и рождение фоновых частиц на нем.

Второй вариант крепления показан на рис. 2, б. Поддерживающая структура крепится на клиновидных выступах опорной панели, соединенных системой поддержки, фиксирующей опорное кольцо в необходимом положении. Систему поддержки и выступы предполагается сделать (как и опор-

ную панель) из композитного материала на основе углепластика с пористым наполнителем.

Оба варианта крепления трубы были исследованы с помощью программного комплекса ANSYS [8]. В обе модели была включена труба (ее структура и размеры согласованы с Вакуумной группой CERN), а также та или иная система поддержки. К сожалению, имеющаяся версия конструкции трубы все еще является предварительной, а сильфоны, которые предложены для использования в трубе, пока не изготовлены, так как для их производства требуется около девяти месяцев с момента окончательного решения о дизайне трубы. Именно механические свойства сильфонов представляют наибольшую неопределенность в анализе [9]. В качестве начального приближения использовалась модель, в которой толщина стенок сильфона постоянна по всей его поверхности.

В процессе оптимизации удалось так подобрать точки крепления трубы, что ее прогибы в критических областях не превышают 1 мм для первого варианта (см. рис. 2, а) и 0,5 мм для второго (рис. 2, б), а образующиеся при смещениях поглотителя напряжения находятся на безопасном уровне. Величина реакции опоры в точке крепления трубы 4 оценивается в 18,5 Н.

Описание тестового стенда

Для проверки применимости конечно-элементного анализа в использованных приближениях было принято решение экспериментально воспроизвести аналогичные условия на стенде и сравнить эти данные при использовании различных сильфонов с полученными на базе модели в программном комплексе ANSYS. Общий вид изготовленного стенда показан на рис. 3. В соответствии с ним была построена модель в системе конечно-элементного ANSYS.

В построенной модели сильфонная группа, состоящая из двух сильфонов 1, соединена с отрезком трубы 7 длиной 600 мм.

Торец трубы 2 закреплен по трем координатам (смещения DX , DY и DZ фиксированы), вращения вокруг всех осей координат свободны.

Торец сильфонной группы 3 позволяет выполнять смещения по координате Y на расстоянии от 0 до минус 10 мм, по вращениям и остальным координатам он фиксирован.

Узел подвеса трубы свободен по вращению по всем осям; положение по осям X и Y фиксировано.

Длина отрезка трубы 7 была выбрана так, чтобы изгибающий момент трубы в точке подвеса был близок по величине моменту, возникающему в полномасштабной

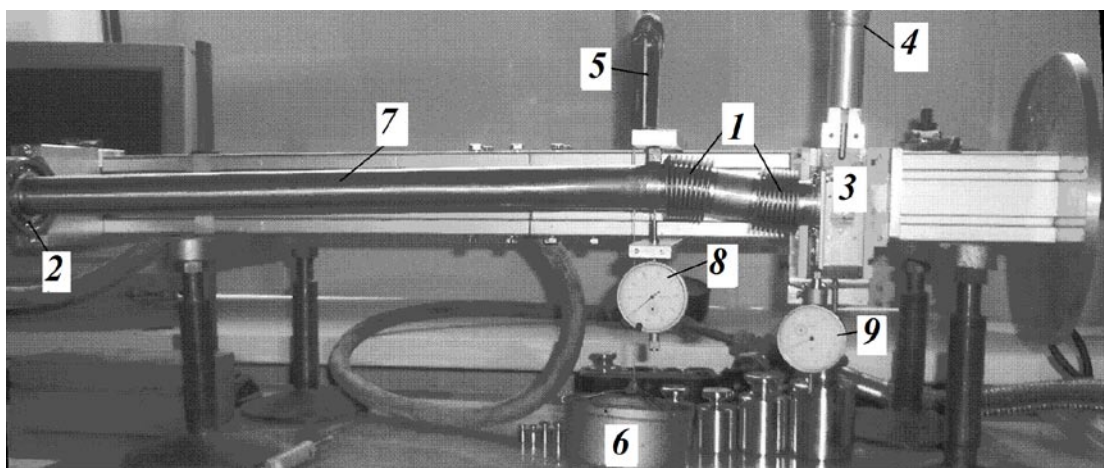


Рис. 3. Общий вид стенда для измерения параметров сильфонной группы:
 1 – сильфонная группа; 2 – торец трубы в подшипнике; 3 – торец сильфонной группы;
 4 – механизм регулируемого смещения сильфона; 5 – узел подвеса с грузом 6; 7 – вакуумированная труба; 8, 9 – измерители смещения точки подвеса трубы и смещения торца сильфонной группы

модели (где составная труба имеет длину более 5 м).

Технические характеристики испытательного стенда

Механическая конструкция испытательного стенда воспроизводит условия, которые возникают в реальной пучковой трубе при смещении абсорбера на расстояние до 10 мм в какую-либо сторону. Стенд имеет массивное основание, предназначенное для компоновки и крепления основных узлов стенда и обеспечивающее проведение испытаний образцов в двух положениях: горизонтальном и вертикальном. Стенд оборудован механизмом перемещения 4 для регулируемого смещения (до 10 мм) торца сильфонной группы 3 в направлении, перпендикулярном горизонтальной оси. Степени свободы торца трубы 2, то есть фиксации трубы по координатам и ее свободное вращение по всем осям, обеспечиваются подшипником; туда же подведен шланг форвакуумного насоса для откачки трубы 7. В состав стенда входят также измерительные устройства 8 и 9, предназначенные для определения смещений креплений трубы в точках 3 и 5.

Порядок проведения стендовых испытаний

1. Лабораторный образец двухсильфонного компенсирующего устройства устанавливается в опору механизма крепления трубы стенда в вертикальном положении.

2. Отмечается начальное показание индикатора смещения точки поддержки 8, установленного в месте соединения сильфонного компенсатора и трубы.

3. Свободный конец сильфонного компенсатора устанавливается в механизме перемещения при соблюдении двух условий:

показания индикатора 8 не должны изменяться;

значение длины сильфонного компенсатора должно сохраниться.

4. Конструкция стенда разворачивается в горизонтальное положение, после чего производится смещение торца сильфонной группы по индикатору 9 на желаемое состояние.

5. В месте соединения сильфонного компенсатора с трубой устанавливается груз 6, вес которого подбирается так, чтобы воспроизвести начальные показания индикатора 8, то есть вернуть положение трубы 7 в исходное состояние.

Ввиду того, что необходимые нам алюминиевые сильфоны не выпускаются промышленностью, для экспериментальных исследований мы использовали доступные нам образцы сильфонов со сходными характеристиками (см. табл. 1).

Результаты измерений

В ходе испытаний на стенде были измерены механические характеристики данных сильфонов при различных нагрузках. Результаты измерений сведены в табл. 2. В усредненное измеренное значение силы реакции опоры (столбец 4) введена поправка на силу давления измерительного штифта индикатора, которая составляет 0,83 Н. Видно, что в результате проведенных исследований установлено весьма близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных, с разницей, не превышающей в среднем 2,5 Н. Точность измерения силы реакции опоры составляет около 5 г, что обуславливает относительную точность измерений, приведенную в табл. 2 и 3.

Для сильфона, изготовленного фирмой (IV), была измерена зависимость реакции опоры от величины смещения фланца (табл. 3). Набор полученных результатов с поправкой на силу давления измерительного штифта на трубу, описывается моделью с точностью, не превышающей 10 %. Это демонстрирует применимость предложенного описания для сильфонов с различными типоразмерами, изготовленных из разных материалов, и дает основания доверять предсказаниям модели и для случая алюминиевых сильфонов.

На основании полученных результатов можно ожидать, что расчетная величина реакции опоры 18,5 Н, полученная из анализа в рамках комплекса ANSYS для алюминиевых сильфонов, изготовленных в CERN, также будет близка к реальной. Разница между экспериментальными и теор-

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по силе реакции опоры при использовании сильфонов, изготовленных различными фирмами

Фирма-изготовитель	Расчетная (ANSYS), Н	Измеренная на стенде, Н	Усредненное значение с поправкой, Н	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
(II)	18,5	21,5 20,0 18,0 19,5 20,5	20,7	11,0 ± 0,3
(III)	22,4	24,0 23,5 25,0 25,5 25,3	25,5	12,0 ± 0,2
(IV)	23,2	24,0 24,3 24,0 25,5	25,2	8,0 ± 0,2

Примечания:

1. Номера фирм-изготовителей соответствуют приведенным в табл. 1.
2. В усредненное значение силы реакции опоры введена поправка на силу давления измерительного штифта индикатора (0,83 Н).

Таблица 3

Экспериментальная и расчетная зависимости реакции опоры от смещения имитатора абсорбера для сильфона, изготовленного фирмой IV (Германия)

Величина смещения, мм	Сила реакции опоры, Н		Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
	Расчетная (ANSYS)	Измеренная с поправкой*	
-2	4,6	4,71	2,34 ± 0,87
-4	9,3	9,36	0,64 ± 0,54
-6	13,9	14,36	3,20 ± 0,36
-8	18,6	19,86	6,34 ± 0,27
-10	23,2	25,22	8,01 ± 0,22

*См. примечание 2 к табл. 2

ретическими данными, по-видимому, обусловлена тем, что модель была создана в предположении постоянного значения толщины стенки сильфона, что, скорее всего, не соответствует реальности.

Таким образом, полученные в статье результаты показывают, что модель, построенная в рамках программного комплекса ANSYS, позволяет с достаточной точностью (около 10–15 %) описать реакцию опоры

при смещениях правой точки крепления, что приводит к деформациям системы менее 1 мм и безопасным напряжениям в деталях трубы и креплениях.

Авторы благодарны ведущему инженеру-технологу Г.В. Рыбакову и электромеханику 6-го разряда В.В. Сушкову (сотрудники Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Констан-

тинова) за помощь в создании стенда и измерениях. Авторы также выражают благодарность фирме Apel Bellows, безвозмездно предоставившей для исследований образцы своей продукции.

Работа выполнена в рамках контракта с НИЦ Курчатовский институт, договор № 140501204 от 5.05.12; а также по госконтракту № 11.519.11.6030 от 14 марта 2012 г. с Министерством образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aamodt, K.** The ALICE experiment at the CERN LHC [Text] / K. Aamodt, A. A. Quintana, R. Achenbach, [et al.] for the ALICE Collaboration // *Journal of Instrumentation*. – 2008. – Vol. 3. – P. S08002 (259 p.).
2. **Das, D.** Performance and first physics results of the ALICE muon spectrometer [Text] / D. Das [for the ALICE Collaboration] // *Nuclear Physics*. – 2011. – Vol. A862–863. – P. 223–230.
3. **Alessandro, B.** ALICE: Physics performance report [Text]: Vol. II. / B. Alessandro, F. Antinori, J. Belikov [et al.] for the ALICE Collaboration // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. – 2006. – Vol. 32. – P. 1295–2040.
4. **Abelev, B.** Production of muons from heavy flavour decays at forward rapidity in pp and Pb–Pb collisions [Text] / B. Abelev, J. Adam, D. Adamova [et al.] for the ALICE Collaboration // *Physical Re-*

- view Letters. – 2012. – Vol. 109. – P. 112301(11 p.)
5. **Uras, A.** Feasibility study for a muon forward tracker in the ALICE experiment [Электронный ресурс] / A. Uras, L. Massacrier [for the ALICE Collaboration] // International Europhysics Conf. on High Energy Physics (HEP- 2011), Grenoble; France. – 2011. – Available at: arXiv: <http://fr.arXiv.org/abs/1201.0680>
6. Upgrade of the ALICE experiment. Muon forward tracker letter of intent addendum [Text] / ALICE Collaboration // to be printed in CERN Note, ALICE-UG-003, 2013. – 88 p.
7. **Андреева, Л.Е.** Сильфоны. Расчет и проектирование [Текст]: Под ред. Л.Е. Андреевой. – М.: Машиностроение, 1975. – 230 с.
8. ANSYS simulations portal [Электронный ресурс] / ANSYS Company // <http://www.ansys.com>

REFERENCES

1. **Aamodt K., Quintana A.A., Achenbach R. et al.** The ALICE experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 2008, Vol. 3, p. S08002 (259 p.)
2. **Das D.** Performance and first physics results of the ALICE muon spectrometer. *Nuclear Physics*, 2011, Vol. A862–863, pp. 223–230.
3. **Alessandro B., Antinori F., Belikov J. et al.** ALICE: Physics performance report: Vol. II. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2006, Vol. 32, pp. 1295–2040.
4. **Abelev B., Adam J., Adamova D. et al.** Production of muons from heavy flavour decays at forward rapidity in pp and Pb–Pb collisions. *Physical*

- Review Letters*, 2012, Vol. 109, p. 112301(11 p.)
5. **Uras A., Massacrier L.** Feasibility study for a muon forward tracker in the ALICE experiment. International Europhysics Conf. on High Energy Physics (HEP-2011), Grenoble; France, 2011. Available at: arXiv: <http://fr.arXiv.org/abs/1201.0680>
6. Upgrade of the ALICE experiment. Muon forward tracker letter of intent addendum. ALICE Collaboration to be printed in CERN Note, ALICE-UG-003, 2013, 88 p.
7. **Andreeva L.E.** Sil'fony. Raschet i proektirovanie. Moscow, Mashinostroenie, 1975, 230 p. (rus)
8. ANSYS simulations portal. ANSYS Company, available at: <http://www.ansys.com>

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий кафедрой экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
berdnikov@spbstu.ru

БЕРДНИКОВ Александр Ярославич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alexber@phmf.spbstu.ru

ЕВСЕЕВ Валерий Алексеевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова Роща
evs@pnpi.spb.ru

МИФТАХОВ Наиль Масгутович — ведущий инженер Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова Роща
nail@pnpi.spb.ru

НИКУЛИН Владимир Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова Роща
vladimir.nikulिन@cern.ch

САМСОНОВ Владимир Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
samsonov@pnpi.spb.ru

ТАРАСЕНКОВА Ольга Павловна — ведущий инженер-конструктор Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова Роща
tarassen@pnpi.spb.ru