

СОЗДАНИЕ ВРЕМЯПРОЕКЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО ДЕТЕКТОРА ПРОЕКТА NICA

*А. В. Аверьянов, А. Г. Бажажин, С. В. Верещагин *,
С. А. Запорожец, В. Н. Зрюев, Ю. Т. Кирюшин,
А. О. Колесников, Ю. Лукстиньи, С. А. Мовчан, А. В. Пиляр,
С. В. Разин, А. А. Рыбаков, В. А. Самсонов, О. В. Фатеев,
В. Ф. Чепурнов, В. В. Чепурнов, Г. А. Черемухина*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В рамках научной программы по изучению горячей и плотной ядерной материи в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ реализуется мегапроект NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) на базе ускорителя нуклотрон-М. Новый ускорительный комплекс позволит исследовать свойства плотной барионной материи при столкновении тяжелых ионов в широком диапазоне атомных масс — от pp -столкновений в диапазоне значений энергии $\sqrt{S_{pp}} = 12\text{--}27$ ГэВ/нуклон и $d + d$ при $\sqrt{S_{NN}} = 4\text{--}13,8$ ГэВ/нуклон со средней светимостью $L = 10^{32}$ см⁻² · с⁻¹ до столкновений $Au^{+79} + Au^{+79}$ в диапазоне значений энергии $\sqrt{S_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ/нуклон при средней светимости $L = 10^{27}$ см⁻² · с⁻¹ (Au^{+79}). В коллайдере предусмотрены две точки пересечения пучков, в одной из которых будет располагаться экспериментальная установка «Многоцелевой детектор» (Multi-Purpose Detector — MPD). Времяпроекционная газовая камера (Time-Projection Chamber — TPC) является основным трековым детектором и детектором идентификации частиц установки MPD. В статье представлены структура установки MPD, конструкция и основные рабочие параметры TPC и ее подсистем, описана система электроники считывания (Front-End Electronics — FEE), а также процедура сборки и интегрирования TPC в MPD.

In the framework of the JINR scientific program on study of hot and dense baryonic matter a new accelerator complex Ion Collider fAcility (NICA) based on the Nuclotron-M is under realization. It will operate at luminosity up to 10^{27} cm⁻² · s⁻¹ for Au^{79+} ions. Two interaction points are foreseen at NICA for two detectors which will operate simultaneously. One of these detectors, the Multi-Purpose Detector (MPD), is optimized for investigations of heavy-ion collisions. The Time-Projection Chamber (TPC) is the main tracking detector of the MPD central barrel. It is a well-known detector for 3-dimensional

*E-mail: vereschagin@jinr.ru

tracking and particle identification for high multiplicity events. The conceptual layout of MPD and detailed description of the design and main working parameters of TPC, the readout system based on MWPC and readout electronics as well as the TPC subsystems and tooling for assembling and integration of TPC into MPD are presented.

PACS: 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей в изучении столкновений тяжелых ионов является исследование горячей и плотной ядерной материи. Интерес представляет переход адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. Диапазон значений энергии столкновения ($\sqrt{S_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ) и разнообразие сталкивающихся ядер ускорительного комплекса NICA [1–3], на котором будет располагаться многоцелевой детектор (MPD), позволит изучить достаточно большую область фазовой диаграммы, а высокая светимость коллайдера ($L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) — зарегистрировать необходимое количество событий даже для очень редких процессов.

Детектор MPD позволяет измерять треки заряженных частиц, образующихся в соударениях ускоренных ионов в широкой области псевдобыстрот

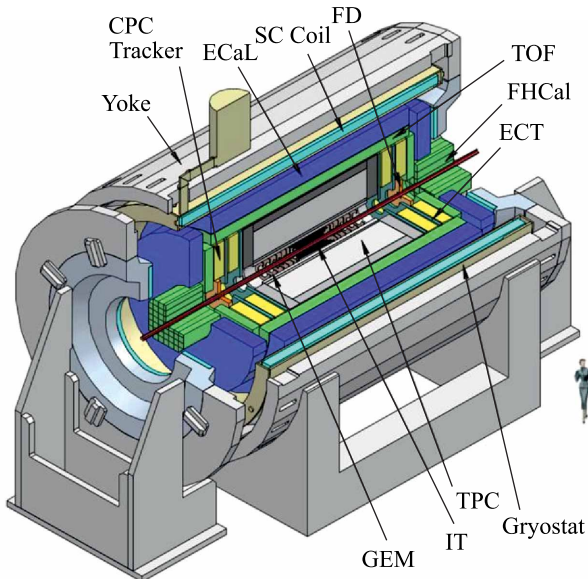


Рис. 1. Установка MPD

$|\eta| < 3$ и частоте столкновений до 7 кГц. Структурная схема MPD показана на рис. 1. В центральной области MPD располагается времяпроекционная камера TPC, которая обеспечивает регистрацию треков заряженных частиц, измерение их импульсов и идентификацию по потерям энергии совместно с системой времени пролета (TOF), а также электромагнитный калориметр (ECaL) для регистрации фотонов и электронов.

Основным трековым детектором MPD является времяпроекционная камера. Это хорошо известный детектор, предназначенный для измерения треков заряженных частиц и их идентификации при высокой частоте событий. Она должна обеспечивать:

— эффективную регистрацию треков заряженных частиц в области псевдобыстрот $|\eta| < 1,2$;

— импульсное разрешение около 3% для частиц с энергией в пределах $0,1 < p_t < 1$ ГэВ/c;

— двухтрековое разрешение около 1 см;

— разрешение dE/dx не хуже 8%.

Эти требования должны выполняться при множественности до 1000 заряженных частиц в центральных столкновениях и частоте событий ~ 7 кГц.

1. ВРЕМЯПРОЕКЦИОННАЯ КАМЕРА TPC

Структурная схема времяпроекционной камеры TPC показана на рис. 2. Она представляет собой систему коаксиальных полых цилиндров, ось которой направлена вдоль пучка ускорителя NICA параллельно направлению

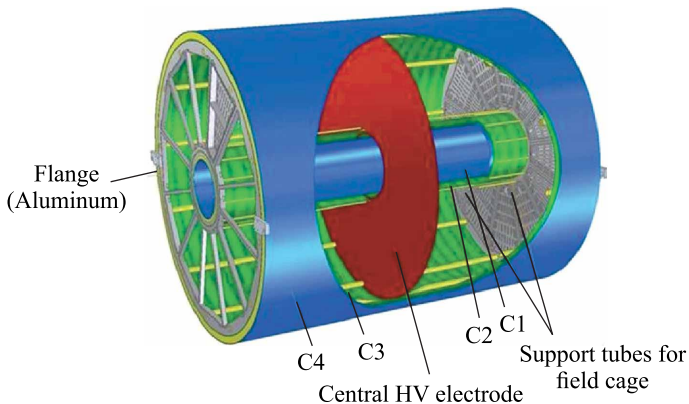


Рис. 2. Структурная схема TPC

Основные параметры ТРС

Параметр	Величина
Длина ТРС, см	340
Радиус внешней оболочки ТРС, см	140
Радиус внутренней оболочки ТРС, см	27
Внешний радиус дрейфового объема, см	133
Внутренний радиус дрейфового объема, см	34
Длина дрейфового объема, см	163,1 (для каждой половины)
Высоковольтный (HV) электрод	Мембрана в центре ТРС
Напряженность электрического поля, В/см	140
Магнитное поле, Тл	0,5
Рабочая газовая смесь	90 % аргона + 10 % метана
Коэффициент газового усиления	10^4
Скорость дрейфа, см/мкс	5,45
Время дрейфа, мкс	≤ 30
Температурная стабильность, °С	$< 0,5$
Число считывающих камер	24 (по 12 на каждый торец)
Сегментация по φ , °	30
Размеры пэдов, мм	5×12 и 5×18
Число пэдов	95232
Число рядов пэдов	53
Подавление нулей (Zero suppression), %	До 90
Максимальная скорость регистрации событий, кГц	~ 7 (при светимости 10^{27})
Время формирования сигнала, нс	180–190
Отношение сигнал–шум	30:1
Динамический диапазон, бит	10
Скорость оцифровки, МГц	10
Временная глубина оцифровки	310 временных меток
Двухтрековое разрешение, см	1

однородного магнитного поля (сверхпроводящий соленоид) [4, 5]. Внутренний диаметр ТРС составляет 54 см, внешний — 280 см, а полная длина — 340 см. Важным требованием является уменьшение количества вещества или увеличение «прозрачности» в конструкции ТРС. Допустимая толщина стенок должна быть порядка 5 % X_0 .

Однородное электрическое поле, необходимое для дрейфа электронов, создается в рабочем объеме центральным высоковольтным электродом, си-

стемой стриповых электродов и катодной плоскостью считывающих камер. Радиальные составляющие магнитного и электрического полей не должны превышать $5,2 \cdot 10^{-4}$ [6], чтобы достичь требуемого разрешения поперечного импульса.

Считывающая система ТРС основана на многопроволочной пропорциональной камере с пэдовым катодным считыванием. Собираемый заряд наводится на массив пэдов, усиливается, преобразовывается в функцию от времени и далее в оцифрованном виде считывается.

Контроль газового усиления осуществляется калибровочным сигнальным откликом, полученным путем облучения газового объема радиоактивным изотопом ^{83}Kr . Данный метод применен в [7, 8], где было показано, что результирующее варьирование газового усиления порядка 10 % может быть скорректировано с точностью 0,5 %.

В ТРС будет использоваться газовая смесь, состоящая из 90 % аргона и 10 % метана. Избыточное давление газа в рабочем объеме ТРС не должно превышать 2 мбар. Оптимальная скорость дрейфа с минимальными флуктуациями по температуре и давлению для аргон-метановой смеси достигается при напряженности электрического поля $E = 140$ В/см. Термоизоляция ТРС должна гарантировать температурную стабильность около $0,5^\circ\text{C}$ для всего газового объема [7].

Основные параметры ТРС представлены в таблице.

Корректная работа ТРС обеспечивается рядом ее подсистем:

- считывающими камерами (ROC);
- детекторной электроникой (FEE);
- лазерной системой калибровки (Laser Calibration System);
- системой охлаждения (Cooling System);
- газовой системой (Gas System).

2. КОНСТРУКЦИЯ ТРС

Для создания ТРС использованы полые тонкостенные монолитные полномащтабные цилиндры (см. рис. 2), изготовленные из композитного пластика (толщина стенок С1 и С2 — 3 мм, С3 — 4 мм и С4 — 6 мм), и торцевые алюминиевые фланцы. Зазор между С1–С2 и С3–С4 заполнен азотом N_2 для защиты от высоковольтного разряда и предотвращения диффузии O_2 и H_2O в дрейфовый объем ТРС. Для обеспечения требуемой величины напряженности электрического поля в дрейфовом объеме на центральный электрод ТРС подается 23 кВ. Величина зазора между цилиндрами 30 мм.

Цилиндрические оболочки для ТРС, изготовленные на российском производстве, состоят из одного слоя стекловолокна толщиной 0,5 мм, двух слоев

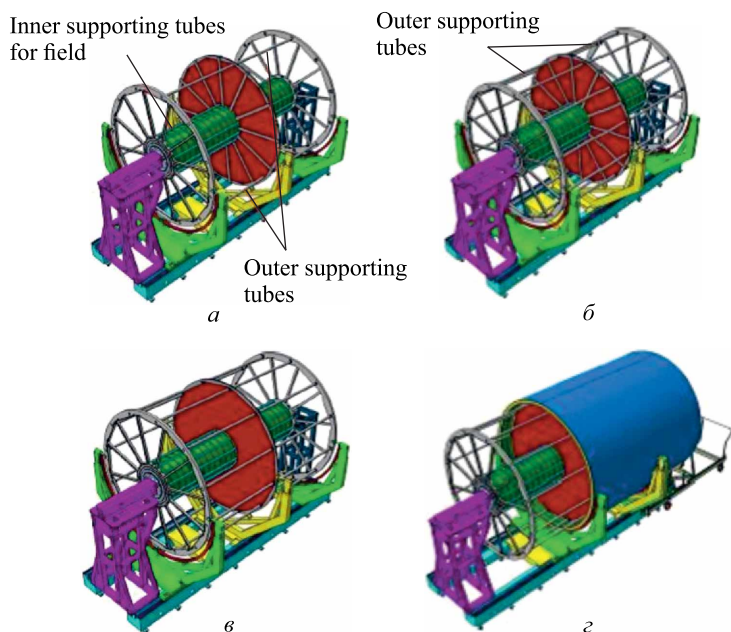


Рис. 3. Этапы сборки ТРС

тедлара толщиной 25 мкм, 3-мм слоя кевлара и еще двух слоев тедлара соответственно. Слои из тедлара используются для обеспечения газовой непроницаемости, а кевларовые слои — для жесткости. Оболочки С1 и С4 имеют алюминиевый слой толщиной 50 мкм для электромагнитной защиты, а оболочки С2 и С3, имеющие алюминиевые полоски толщиной 50 мкм, шириной 30 мм и шагом 100 мм, — для коррекции электрического поля. Дополнительные уголки в конструкции оболочек С1, С2 и С3 сделаны для удобства сборки ТРС. Угол в середине С2 будет использоваться для фиксации высоковольтного электрода. Соединение полосок осуществляется через разделительные резисторы 500 МОм. Результаты моделирования показали, что деформация, к примеру, оболочки С2 составляет меньше 100 мкм.

С учетом того, что оболочки, составляющие конструкцию ТРС, существенно отличаются друг от друга по размерам, включая разравнивающую сетку, была выбрана концепция горизонтальной сборки по каждому элементу. Стадии сборки ТРС схематично показаны на рис. 3. Рельсы, с высокой точностью расположенные на плоской поверхности, с ручным силовым выравнивающим модулем вдоль оси и система из трех мобильных приспособлений позволяют создать механическую конструкцию для пошаговой сборки элементов ТРС.



Рис. 4. Специальные приспособления для сборки ТРС

На рис. 4 показаны специальные модули оснастки для сборки ТРС, созданные на заводе механических и инженерных конструкций в Брянске (РФ) и доставленные в ЛФВЭ.

3. СЧИТЫВАЮЩАЯ КАМЕРА ROC

Считывающая камера (ReadOut Chamber — ROC), выполненная на основе многопроводочной пропорциональной камеры (MWPC), состоит из трех проводочных плоскостей, педовой и изолирующей плоскостей и трапециевидной алюминиевой рамки. Сечение структуры камеры показано на рис. 5.

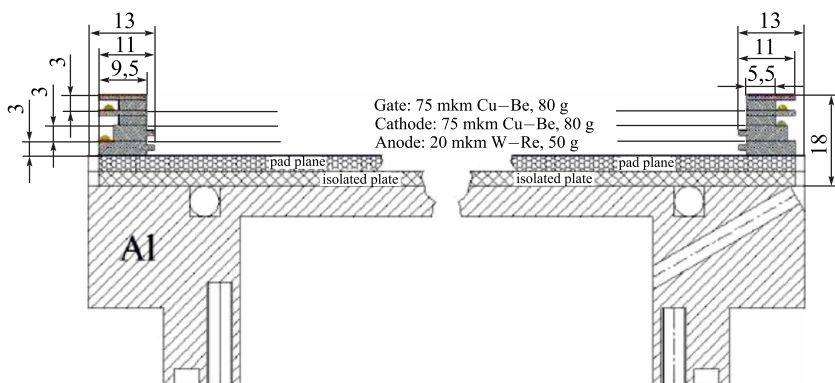


Рис. 5. Сечение камеры ROC

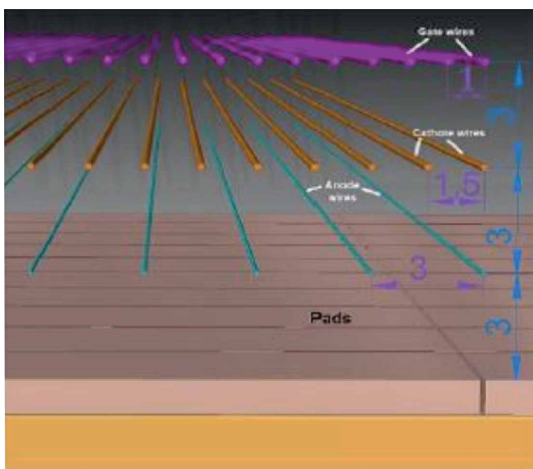


Рис. 6. Схема расположения проволочных плоскостей камеры ROC

Зазор между анодной и пэдовой плоскостями такой же, как и зазор между анодной и катодной проволочными плоскостями, и составляет 3,0 мм (рис. 6). Для того чтобы уменьшить собранный заряд на единицу длины и, следовательно, варьирование коэффициента газового усиления при прохождении заряженных частиц, шаг анодной проволочки должен быть достаточно малым. Он соответствует длине пэда и равен 3 мм. Шаг катодной проволоки равен 1,5 мм. Запирающая сетка располагается на 3 мм выше катодных проволочек, что является достаточным, чтобы приостановить поток ионов внутри разрешенного временного интервала. Шаг проволочек запирающей сетки составляет 1,25 мм.

Все проволоочки и пэдовые ряды располагаются по азимуту. На трапециевидной пэдовой плоскости длина проволоочек варьируется от 190 мм внизу до 620 мм вверху. С целью обеспечения газового усиления на уровне $G = 10^4$ при умеренном анодном потенциале для анодной плоскости была выбрана позолоченная вольфрам-рутениевая проволока диаметром 20 мкм, намотанная под усилием 50 г. Для катодной плоскости используется медно-бериллиевая проволока диаметром 75 мкм, намотанная при усилении 80 г.

Пэдовая плоскость имеет толщину 3 мм и представляет собой четырехслойную печатную плату с оптимальной трассировкой печатных элементов. Соединение пэдовых коннекторов с детекторной электроникой FEE осуществляется с помощью гибких каптоновых кабелей. На внутренней области пэдовой плоскости расположены 27 рядов пэдов с размерами 5×12 мм и на внешней — 26 рядов пэдов с размерами 5×18 мм, что соответствует числу каналов регистрации TPC, равному 95232.

4. ДЕТЕКТОРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Количество каналов регистрации TPC составит более 95 тыс., что приведет к большому потоку данных: для каждого из каналов заряд, индуцируемый на пэдах, связанных с каналами регистрации детекторных карт FEC, собирается в течение времени дрейфа 31,2 мкс, усиливается, формируется и оцифровывается 10-битным АЦП с частотой 10 МГц. В потоке выходящих из АЦП данных преобладают шумовые отсчеты, поскольку сигнальный отсчет в канале появляется только тогда, когда траектория частицы пересекает часть рабочего объема детектора, проекция которого попадает на пэд данного канала в период оцифровки. Для удаления шумовых данных в картах электроники используется аппаратно-реализованный цифровой фильтр.

Для того чтобы удовлетворить требования к TPC в рамках проекта NICA, считывающая система должна обеспечивать величину пропускной способности до 7 Гбайт/с при средней множественности ~ 300 треков и максимальной до 1000 треков. В разработанной детекторной карте FEC были использованы применяемые в ALICE TPC (PASA и ALTRO [9]) специализированные микросхемы, обеспечивающие необходимое отношение сигнал–шум, цифровую обработку и сжатие данных на аппаратном уровне в реальном времени. Важным компонентом карт и контроллеров являются программируемые логические интегральные схемы (Field Programmable Gate Array — FPGA), выполняющие контрольные и коммуникационные функции.

Собранные с 1488 карт данные в упакованном виде передаются в считывающие контроллеры RCU по гигабитным последовательным линиям связи. Контроллер RCU выполняет все ключевые функции системного уровня: синхронизацию работы карт FEC, конфигурирование каналов регистрации, счи-

тывание упакованных данных и их передачу в систему сбора данных MPD по оптическим линиям связи. RCU также выполняет контроль рабочих напряжений, токов, температур и состояние каналов регистрации.

В разработанной системе считывающих контроллеров и FEC-карт предусмотрена возможность использования новой перспективной микросхемы SAMPA [10, 11] вместо пары PASA и ALTRO. Микросхема SAMPA содержит 32 канала регистрации и аппаратно-интегрированные части: аналоговую, АЦП и цифровой процессор. Увеличение интеграции в SAMPA позволит уменьшить количество материала в торце TPC, а ее способность к регистрации сигналов как положительной, так и отрицательной полярности даст возможность в дальнейшем заменить считывающие камеры на основе MWPC на ROC на основе GEM. Небольшое количество первых образцов микросхем SAMPA были испытаны, и результаты показали, что применение данных микросхем в FEC имеет перспективу. Более детальная информация по FE-электронике TPC/NICA представлена в [12].

5. СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ КАЛИБРОВКИ

С учетом опыта экспериментов STAR [7] и ALICE [8] предполагается для калибровки TPC использовать систему на основе UV-лазера (266 нм).

Через систему полупрозрачных зеркал и призм лазерные лучи диаметром 1 мм инжектируются в дрейфовый объем TPC, как показано на рис. 7, и со-

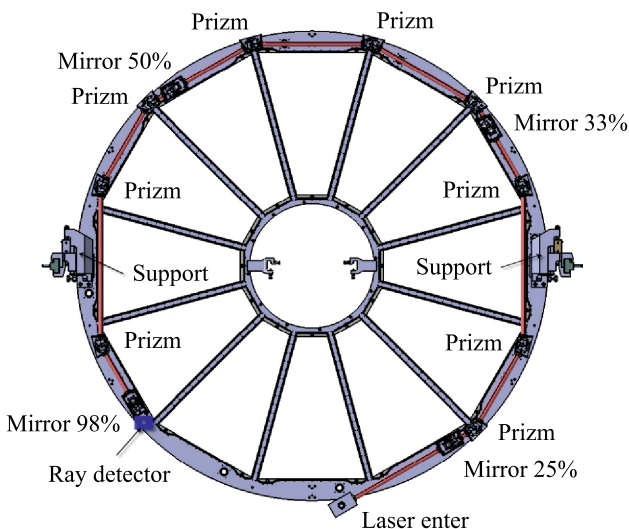


Рис. 7. Схема ввода лазерных лучей в TPC

здают «треки» в ряде последовательных плоскостей, перпендикулярных оси ТРС. Схема одной из плоскостей с 28 «треками» диаметром 1 мм показана на рис. 8. Всего таких плоскостей в ТРС предусмотрено 8, в результате 224 трека, созданных лазерными лучами, достаточно равномерно заполняют объем ТРС, чтобы выполнить все задачи калибровки (измерение скорости дрейфа и оценки искажений электрического поля). Система калибровки будет состоять из двух импульсных лазеров (длительность импульса 5–7 нс, мощность порядка 130 мДж) Nd:YAG–NL303HT-10-FH.

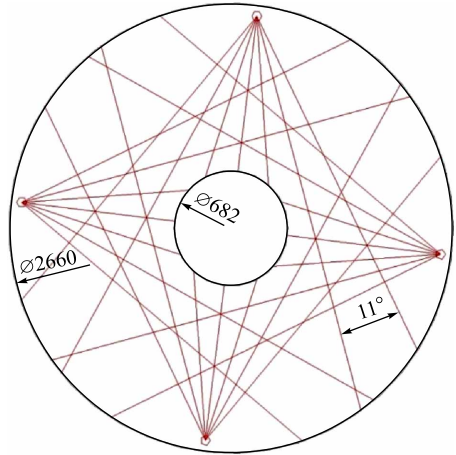


Рис. 8. Схема 28 «треков» в ТРС

6. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Система охлаждения ТРС состоит из внешнего и внутреннего теплового экранов, двух торцевых экранов и охлаждающей системы FEC-карт, низковольтных (Low Voltage — LV) шин и высоковольтного (High Voltage — HV) делителя. Система охлаждения обеспечивает температурную стабильность и однородность внутри дрейфового объема с точностью $\Delta T < 0,5$ °C. Основным источником тепла является FEC-электроника. Каждая FEC рассеивает

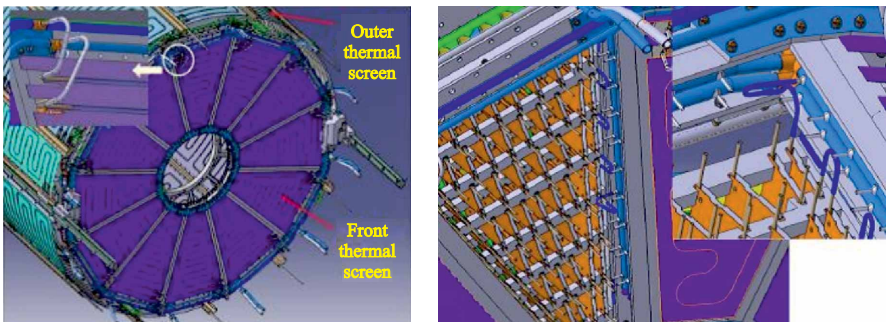


Рис. 9. Дизайн фронтального и внешнего термальных экранов (слева) и система охлаждения 62 FEC-карт (справа)

около 6,4 Вт, одна считывающая камера ROC — около 330 Вт и LV-шина — 20 Вт. Система охлаждения, показанная на рис. 9, в настоящее время находится в процессе реализации.

7. ГАЗОВАЯ СИСТЕМА

При изготовлении газовой системы использовался опыт создания подобных систем в экспериментах STAR и PHENIX [7] (BNL, США) и газовой системы в эксперименте CBM (Дармштадт, Германия) [13].

Газовая система может работать как в режиме рециркуляции во время экспериментов, так и в открытом режиме для «продувки» ТРС. Поскольку расстояние между ТРС и газовой системой порядка 70 м, система включает в себя два контура циркуляции: малый внутренний и большой внешний. Эти контуры управляются двумя аппаратными стойками, показанными на рис. 10. Стойка малого контура располагается на платформе в экспериментальном зале непосредственно вблизи детектора MPD. Использование двух контуров циркуляции газа существенно уменьшает затратную стоимость соединительных трубок большого диаметра, а внешний контур может использоваться без внутреннего и для других экспериментов, например, для тестирования прототипа ТРС. В режиме длительного эксперимента внешний контур используется



Рис. 10. Стойки управления газовой системой ТРС

для анализа газовой смеси в разных точках системы, а именно: для свежеприготовленной смеси, для смеси внутри детектора, для смеси на выходе из модуля очистки внутреннего контура. Газовая система отслеживает изменения внешнего атмосферного давления и поддерживает дифференциальное давление газовой смеси внутри рабочего объема ТРС на уровне $(2,0 \pm 0,1)$ мбар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проект ТРС/NICA находится в процессе реализации, используются новые технологии для отдельных конструктивных элементов и считывающей электроники. Сконструирован и изготовлен ряд специальных приспособлений и инструментов для сборки и интеграции ТРС в установку MPD. Этап «Сборка ТРС» будет окончен в конце 2018 г.

Благодарности. Авторы признательны С. Lippman, D. Vranic, С. Garabatos, L. Musa, А. Лебедеву и А. Kluge за интерес к нашей работе и поддержку. Мы также благодарны коллегам коллаборации SAMPA, в частности М. Vrengant, А. Velure, А. Oskarsson и К. Tun-Lanoe, за помощь в работах по тестированию микросхемы SAMPA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов Н. Н. и др. // УФН. 2016. Т. 186, №4. С. 405–424.
2. Abraamyan Kh. U. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 628. P. 99–102.
3. Kekelidze V. et al. // EPJ Web Conf. 2015. V. 95. P. 01014.
4. Averyanov A. et al. // JINST. 2014. V. 09. P. C09036.
5. Averyanov A. et al. // JINST. 2016. V. 2, No. 1. P. 208–213.
6. The Multipurpose Detector (MPD). Conceptual Design Report. The MPD Detector at the NICA Heavy-Ion Collider at JINR.
http://nica.jinr.ru/files/CDR_MPD/MPD_CDR_en.pdf
7. Anderson M. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 499. P. 659.
8. ALICE TDR 7 “Time Projection Chamber”. CERN/LHCC. 2000–2001. Jan. 2000; Alme J. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 622. P. 316–367.
9. ALICE TPC Readout Chip. User Manual. CERN, 2002. Draft 0.2. ALTRO chip web-page // <http://ep-ed-alice-tpc.web.cern.ch/ep-ed-alice-tpc>.
10. Barboza S. H. I. et al. // JINST. 2016. V. 11. P. C02088.
11. Adolfsson J. et al. // JINST. 2017. V. 12. P. C04008.
12. Cheremukhina G. et al. // Ibid. P. C06031.
13. Kotchenda L. et al. CBM Progress Report. Darmstadt, 2010.