

А.С. Федотов¹, М.А. Медведева², И.А. Зур³, А.В. Куц³, Я.Д. Галкин³,
 В.А. Чеховский³, Ю.А. Федотова³, А.А. Шии⁴, Ю.В. Шафаревич², С.А. Мовчан¹,
 Г.В. Мещеряков¹, А.А. Макаров¹, И.А. Балашов¹, В.Г. Сенкевич⁴, А. Галуза⁴,

¹Объединённый институт ядерных исследований,
 Дубна, 141980, Векслера, 6;

²Белорусский государственный университет,
 Республика Беларусь, Минск, 220030, Бобруйская, 11

³Научно-исследовательский институт ядерных проблем,
 Республика Беларусь, Минск, 220030, Независимости, 4;

⁴ООО Мультипрофильная лаборатория «АркоЛаб»,
 Республика Беларусь, Минск;

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ ROC УСТАНОВКИ MPD КОЛЛАЙДЕРА NICA

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) – мега-сайенс проект по исследованию свойств материи и процессов столкновения и рождения новых частиц с последующими детектированием и идентификацией последних. В рамках работ по созданию NICA ведётся разработка установки MPD (Multi-Purpose Detector)[1] для детектирования продуктов столкновения высокоэнергетических пучков. В состав MPD входят субдетекторы TPC (Time-projection Chamber – времяпрелётная камера)[2] и электромагнитные калориметры ECal (Electromagnetic Calorimeter)[3]. Общая мощность электроники MPD превышает 1 МВт, поэтому в процессе её работы может происходить значительное выделение тепла как внутри, так и вне объёма установки, что может повлиять на точность детектирования событий. Детекторы TPC и ECal для компенсации тепловыделения оснащены водной системой охлаждения и термостабилизации.

Особенностью системы охлаждения и термостабилизации, разрабатываемой для MPD, является

её функционирование в режиме *leakless*. Данный режим требует поддержания давления ниже атмосферного, что предотвращает попадание воды на дорогостоящую детекторную электронику в случае нарушений целостности системы, но может спровоцировать кавитацию в области низких давлений. Стабильная работа системы обеспечивается через контроль температуры и расхода хладоносителя посредством трубчатых электронагревателей (ТЭН) и пневматических клапанов. При этом, режимы запуска, остановки, аварийной остановки, штатного функционирования и отладки включают в себя этапы динамической подстройки с помощью PID-регуляторов. Для обеспечения высокой точности детектирования событий в TPC необходимо добиться термостабилизации рабочей газовой смеси в пределах отклонения 0,1 К от средней температуры газа[4]. Это накладывает ограничения на однородность температурного поля оборудования, находящегося в прямом контакте с газовой смесью – педовой плоскости Read-out chamber (ROC) [5].

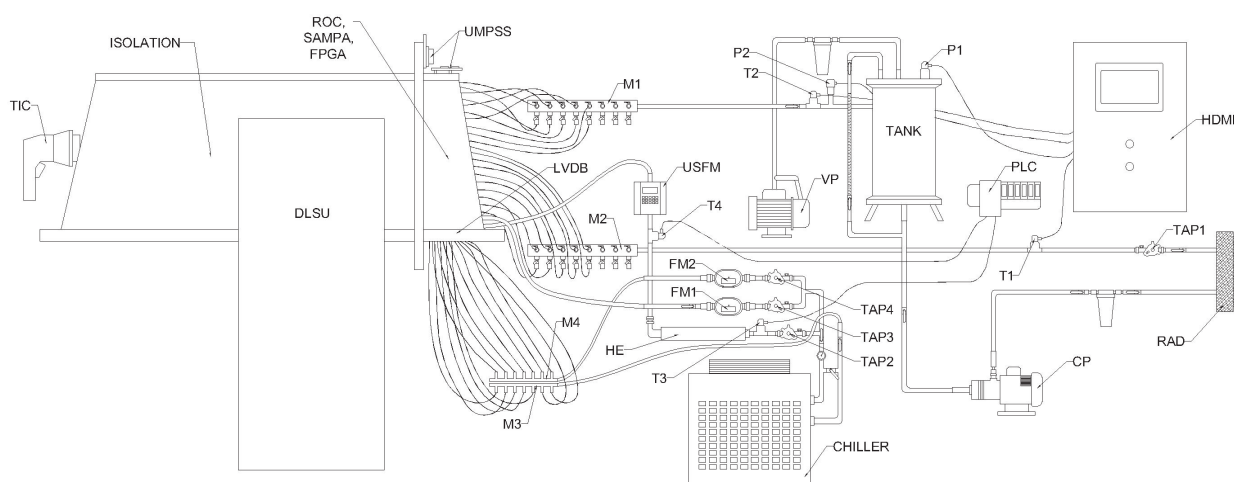


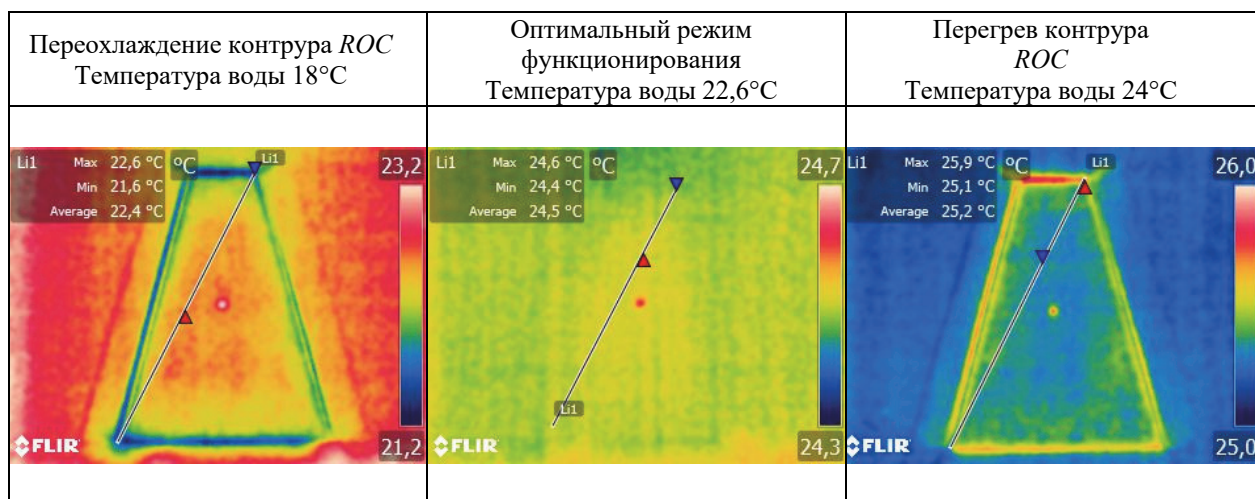
Рис.1. Схема экспериментального стенда. TIC – тепловизор, DLSU – система сбора данных Agilent 34970, TAP – балансировочные краны, VP – вакуумный насос, CP – циркуляционный насос, HDMI – шкаф электроники, FM – расходомеры, М – коллекторы, HE – нагревательные элементы

Таким образом, важную физическую задачу представляет термостабилизация пэдовой плоскости. Экспериментальное исследование проблемы термостабилизации пэдовой плоскости было проведено в Научно-исследовательском институте ядерных проблем (НИИ ЯП, г. Минск) на специально разработанной установке. Данный экспериментальный стенд позволил оценить тепловыделение в системе и построить расходонапорные характеристики при данных условиях эксперимента. Схема стенда представлена на рис. 1. Стенд представляет замкнутую гидродинамическую цепь и обеспечивает циркуляцию хладоносителя (воды) во всём диапазоне расхода (до 9.2 л/мин) как при атмосферном давлении в вакуумном баке, так и в режиме *leakless*.

Среди составляющих стенда стоит выделить следующие элементы:

- ТЭН с системой автоматического PID-регулирования по температуре для дополнительного нагрева хладоносителя, поступающего в контур корпуса камеры ROC;
- Вакуумный (VP) и циркуляционный (CP) насосы;
- охладитель воды (чиллер) для обеспечения расхода в контурах FPGA, LVDB (LVN9) и ROC и поддержания температуры хладоносителя в диапазоне 17 – 26°C, протекающего через радиаторы системы охлаждения FPGA;
- система датчиков давления, расхода (FM) и температуры;
- система балансировочных кранов (TAP) для достижения номинального расхода хладоносителя на каждом контуре;
- универсальная многоканальная система питания (Universal multichannel power supply system); содержит два 8-ми канальных модуля (8 Channel 8 V/12 A Full Floating Channel Board) CAEN A2551;
- герметичный короб для минимизации теплового контакта камеры ROC с атмосферным воздухом и повышения точности результатов бесконтактной пирометрии (измерения тепловизором);
- сенсорная HMI-панель, которая отображает показания установленных датчиков в данный момент времени, а также позволяет задавать номинальный расход в системе и частоту вращения лопастей циркуляционного насоса.

В результате серии экспериментов было выявлено, что уменьшение расхода хладоносителя может привести к увеличению вероятности кавитации в системе, в связи с этим более рациональным представляется регулирование интенсивности теплообмена посредством изменения температуры хладоносителя. При подаче хладоносителя различной температуры в контур корпуса ROC-камеры установлено, что при циркуляции воды с температурой 18,0°C поле температур характеризуется сильной неоднородностью и наблюдается переохлаждение периферийной части относительно центральной части пэдовой плоскости на величину $\approx -1,0$ °C. Увеличение температуры теплоносителя до 24,0°C и выше напротив приводит к перегреву периферийной части ($\approx +0,6$ °C). Экспериментально получено, что оптимальной температурой является 22,6°C – амплитуда температурных флуктуаций относительно средней линии не превышает величину $\approx 0,075$ °C. Пространственные распределения температуры полученные вдоль линии сканирования поверхности пэдовой плоскости представлены на рисунке 2.



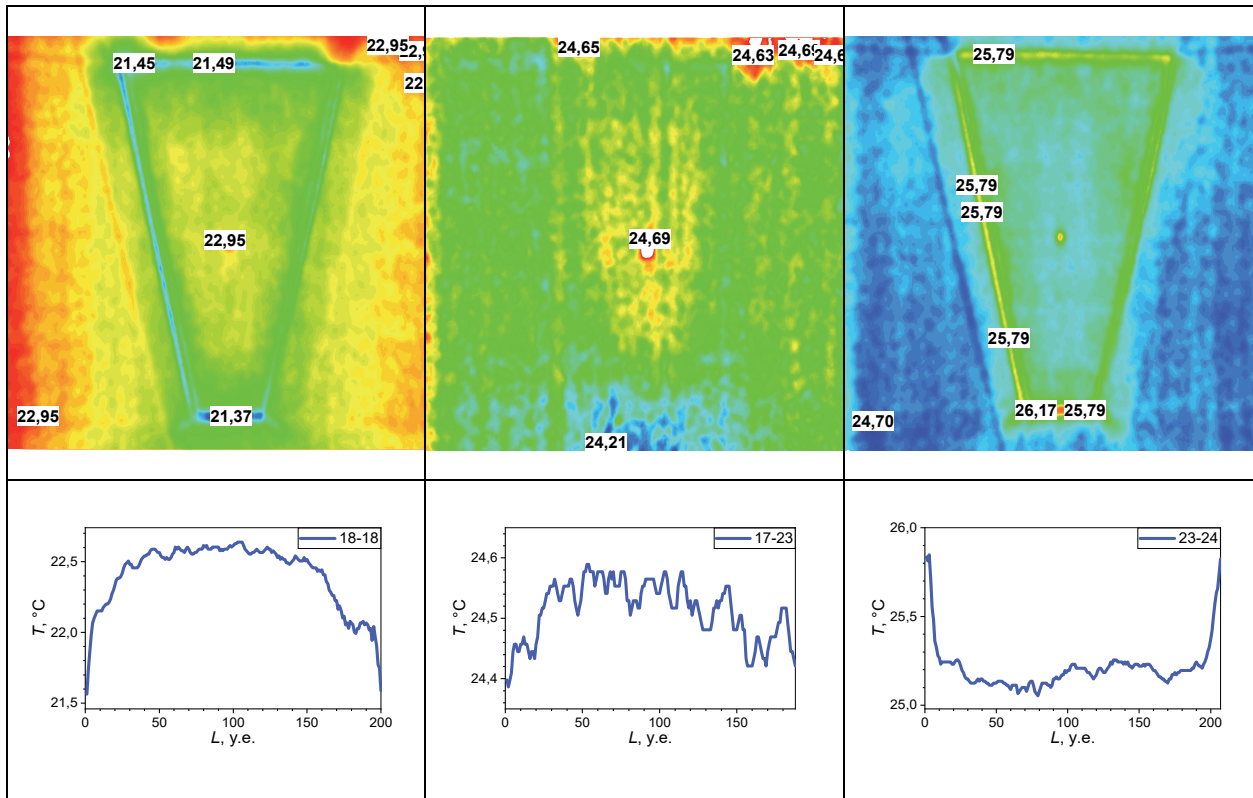


Рис. 2. Результаты пиromетрических измерений распределения температуры на пэдовой плоскости при различных температурах хладоносителя

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность термостабилизации пэдовой плоскости фронтальной электроники детектора Time-projection Chamber установки MPD коллайдера NICA. Полученный результат позволит повысить точность определения координат событий прохождения элементарных частиц через газовый объем детектора.

Исследование проведено в рамках работ по контракту № 100-00627 от 16.12.2022 г. «Изготовление, поставка и монтаж систем термостабилизации и охлаждения детекторов TPC и ECAL установки MPD» между ОИЯИ и НИИ ЯП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abgaryan V.** et al. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // *Eur. Phys. J. A.* 2022. Vol. 58, № 7. P. 140.
2. **Averyanov A.** et al. TPC status for MPD experiment of NICA project // *J. Instrum.* 2017. Vol. 12, № 06. P. C06047–C06047.
3. **Semenov A.Yu.** et al. Electromagnetic calorimeter for MPD spectrometer at NICA collider // *J. Instrum.* 2020. Vol. 15, № 05. P. C05017–C05017.
4. **Alme J.** et al. The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* 2010. Vol. 622, № 1. P. 316–367.
5. **Cheremukhina G.** et al. Front-end electronics development for TPC detector in the MPD/NICA project // *J. Instrum.* 2017. Vol. 12, № 06. P. C06031–C06031.