

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ROC-КАМЕРЫ ДЕТЕКТОРА TPC ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА MPD

*Я. Д. Галкин*¹, *В. Н. Зрюев*², *А. В. Куниц*¹, *А. В. Литомин*¹,
*А. А. Макаров*², *Г. В. Мещеряков*^{2,*}, *С. А. Мовчан*²,
*А. А. Рыбаков*², *О. В. Фатеев*², *В. А. Чеховский*¹

¹ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
Минск

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены результаты измерений температуры имитаторов карт электроники считывания (62 шт.), радиаторов для электроники, корпуса ROC-камеры и пэдовой плоскости камеры для детектора TPC установки MPD на коллайдере NICA. Измерения проводились при двух значениях температуры охлаждающей жидкости. Также представлены результаты расчетов компьютерного моделирования, которые хорошо согласуются с данными измерений. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для создания и оптимизации систем охлаждения и термостабилизации ROC-камер и электроники считывания.

The article presents the results of the temperatures measuring of the electronic card imitators, its radiators and the frame of the ROC chamber for the TPC detector of the MPD facility at the NICA collider. The measurements were carried out with two coolant temperatures. The results of computer simulations are also presented, which are in good agreement with the measurements. The results will be further used to create and optimize cooling and thermal stabilization systems for ROC chambers and FE electronics.

PACS: 29.40.Cs; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

NICA — ускорительный комплекс, который создается на базе Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) с целью изучения свойств плотной барионной материи. Запуск ускорительного комплекса NICA позволит ученым ОИЯИ и других стран, участвующих в проекте, изучать в лабораторных условиях особое состояние вещества,

* E-mail: glebvlm@gmail.com

в котором пребывала наша Вселенная в первые мгновения после Большого взрыва, — кварк-глюонную плазму [1].



Рис. 1. Схема ускорительного комплекса NICA

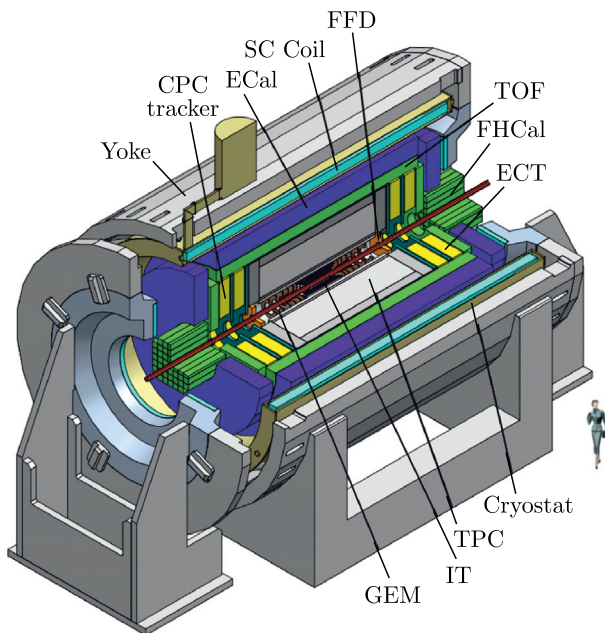


Рис. 2. Схема многоцелевой установки MPD

На ускорительном комплексе NICA предусмотрены две точки столкновения пучков, что позволяет вести эксперименты на двух установках — SPD и MPD (рис. 1). На SPD изучают спиновую структуру частиц при протон-протонных столкновениях, на MPD — столкновения различных ионов. Установка MPD (рис. 2) спроектирована как 4π -спектрометр, способный регистрировать заряженные адроны, электроны и фотоны в столкновениях тяжелых ионов при высокой светимости в диапазоне энергии $\sqrt{s} = 4\text{--}11$ ГэВ/нуклон [1]. Для достижения этой цели MPD будет включать в себя точную трехмерную трековую систему на основе время-проекционной камеры и внутреннего кремниевого трекера и высокоэффективную систему идентификации частиц (PID), основанную на измерениях времени пролета и калориметрии. Основные параметры установки MPD были определены предполагаемыми физическими процессами в кварк-глюонной плазме. При проектной светимости коллайдера частота полезных событий составит около 7 кГц, множественность вторичных частиц — до 1000 частиц для центральных соударений Au + Au при энергии $\sqrt{s} = 11$ ГэВ/нуклон.

Важной частью MPD является времяпроекционная камера (Time-Projection Chamber — TPC). Схема детектора TPC представлена на рис. 3 [2, 3]. TPC содержит по 12 считывающих ROC-камер (Read Out Chamber) с каждой стороны детектора (см. рис. 3).

ROC-камера представляет собой многопроволочную пропорциональную камеру с пэдовым считыванием сигналов. Для анодной плоскости используется золоченая вольфрамовая проволока диаметром 20 мкм, а для остальных плоскостей — бериллий-бронзовая проволока диаметром 80 мкм (рис. 4, а). Общий вид ROC-камеры показан на рис. 4, б.

Параметры детектора TPC обеспечиваются хорошо проработанной системой охлаждения и термостабилизации. Температурная нестабильность рабочей газовой смеси Ag/CH₄ (90 : 10) внутри дрейфового объема TPC

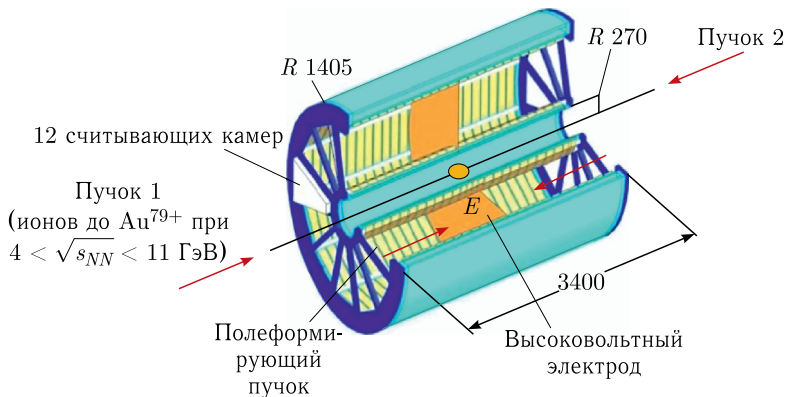


Рис. 3. Схема детектора TPC

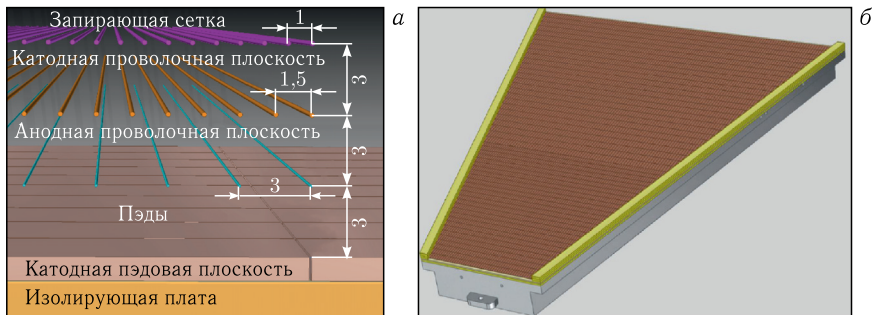


Рис. 4. Схема считывающей камеры (ROC-камеры): а) сечение камеры (в миллиметрах); б) общий вид камеры

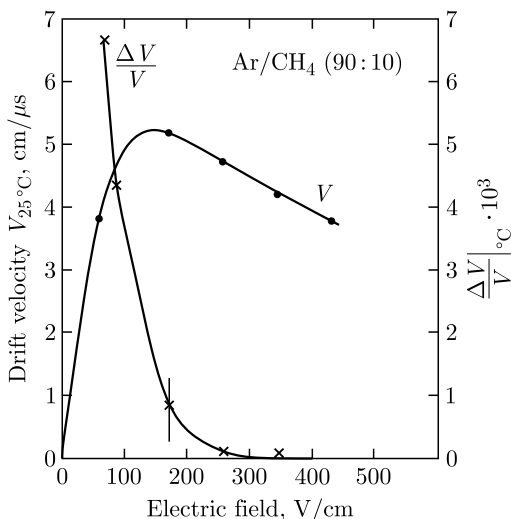


Рис. 5. Зависимость скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля для газовой смеси Ar/CH_4 (90 : 10)

должна быть на уровне не хуже $\Delta T < 0,5^\circ\text{C}$. Требование $\Delta T < 0,5^\circ\text{C}$ определяется быстрым изменением скорости дрейфа электронов первичной ионизации в газе в зависимости от температуры, что влияет на точность определения трека частицы. Это обеспечивается выбором рабочей напряженности электрического поля в дрейфовом объеме ТРС величиной 140 В/см (рис. 5 [5]) и минимизацией влияния теплового потока от окружающих ТРС-детекторов. Минимизация влияния обеспечивается за счет системы цилиндрических и торцевых термоэкранов на корпусе ТРС, охлаждаемых водой с задаваемой температурой.

Каждая электронная плата системы считывания рассеивает с мощностью до 5 Вт. В процессе работы общая рассеиваемая мощность может

достигать величины 310 Вт на одну ROC-камеру и 5 кВт на каждый торец ТРС.

Для выведения избыточного тепла карты считывания установлены на радиаторы с системой водяного охлаждения (СВО).

Целью настоящей работы является экспериментальное и расчетное исследование температурных распределений на корпусе ROC-камеры и электронике считывания, выбор оптимального режима охлаждения с целью минимизации потока тепла во внутренний объем ТРС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

В данной работе преследовались три основные цели:

- 1) обеспечение нормальных условий работы электроники (для устранения ее перегрева была разработана СВО) (рис. 6);
- 2) стабилизация рабочей температуры чипов в узких пределах;
- 3) минимизация диапазона распределения температуры на пэдовой плоскости ROC-камеры.

Охлаждение радиаторов электроники и корпуса ROC-камеры поддерживается двумя специальными устройствами — чиллерами.

Был реализован вариант компоновки «одноэтажного» монтажа электронных карт на узкой части радиатора ROC-камеры. Переходная алюминиевая пластина приклеена на радиатор посредством термопроводящего клея с последующей фиксацией винтами. В эксперименте на стенде использовались имитаторы тепловыделения электронных карт.

Пэддовые плоскости испытывают тепловую нагрузку в зависимости от нагрева электроники считывания. Одной из важных задач является оценка возможности температурной стабилизации пэддовой плоскости.

Была поставлена задача определения эффективности охлаждения электроники на переходной пластине для данной схемы монтажа путем измерения распределения температуры по пластине при условной тепловой нагрузке на стенде 120% от номинальной. Попутно преследовалась задача определения оптимальных температур охлаждающей жидкости (T_1 и T_2) в контурах СВО. Эксперимент проводился на стенде, общий вид которого представлен на рис. 7.

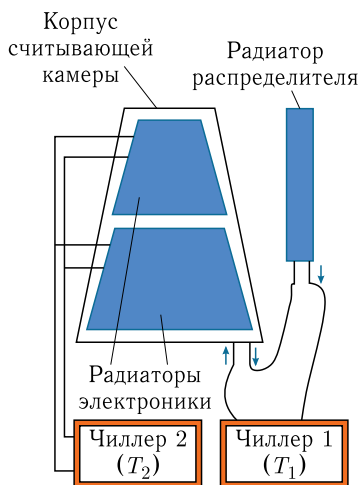


Рис. 6. Упрощенная схема СВО на стенде

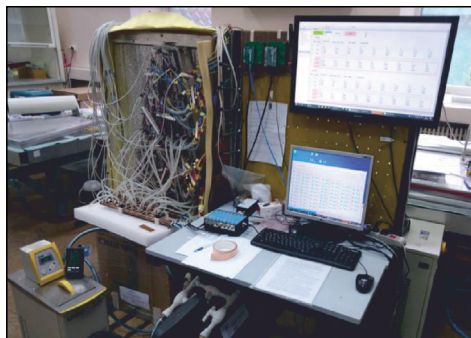


Рис. 7. Общий вид стенда

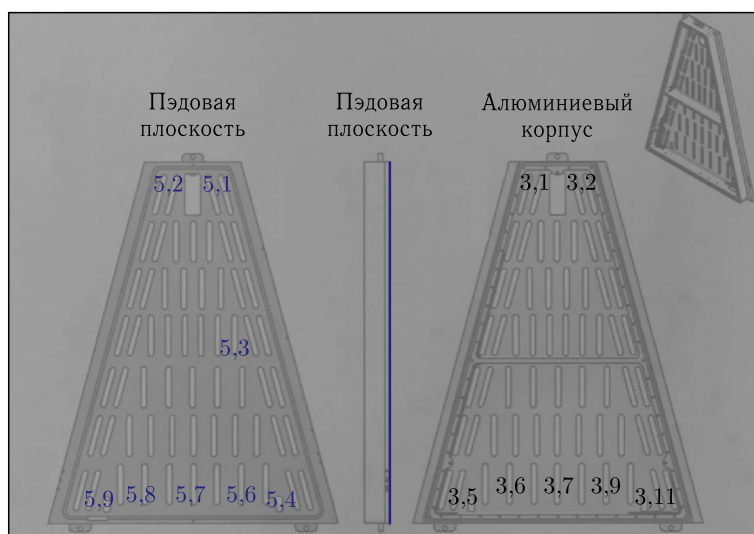


Рис. 8. Общий вид расположения датчиков температуры РТ-100 на пэддовой плоскости РОС-камеры (слева) и на корпусе РОС-камеры (справа). Указаны номера датчиков

Измерения температуры осуществлялись датчиками, расположенными в четырех областях: на пэддовой плоскости РОС-камеры, на внутренней части РОС-камеры (алюминий), на переходной пластине для карт электроники в узкой части камеры и на имитаторах карт электроники. Датчики температуры, кроме расположенных на имитаторах карт, представляют собой платиновые сопротивления РТ-100 класса АА с точностью измерения $\pm 0,1 + 0,0017|t|$ °С и размещены в точках, указанных на рис. 8.

На рис.9 стрелками показаны периферийные области переходной пластины, находящиеся в худших условиях охлаждения. Для того чтобы не допустить перегрева электроники, на стенде была применена многоконтурная СВО ROC-камеры, которая более эффективно снимает тепло с плат электроники в сравнении с одноконтурной СВО. Температура на переходной пластине (Electronic Transition Plate — ETP = панель) контролировалась пятью датчиками в зонах предполагаемых максимальных и минимальных температур (рис. 10).

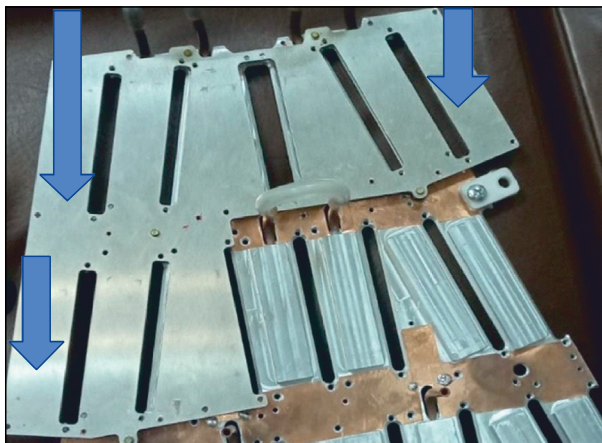


Рис. 9. Переходная пластина для охлаждения карт электроники в узкой части ROC-камеры

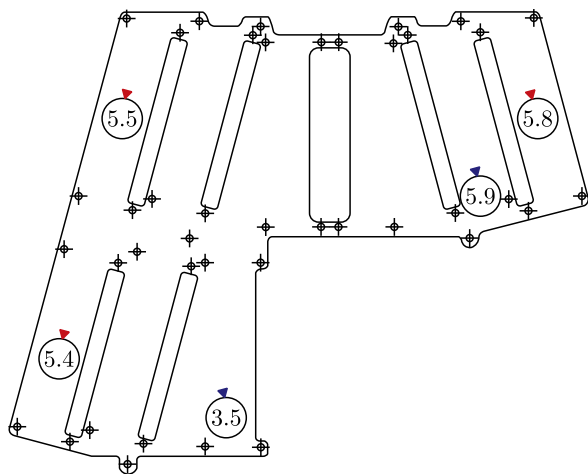


Рис. 10. Общий вид расположения датчиков на переходной пластине и имитатора электроники

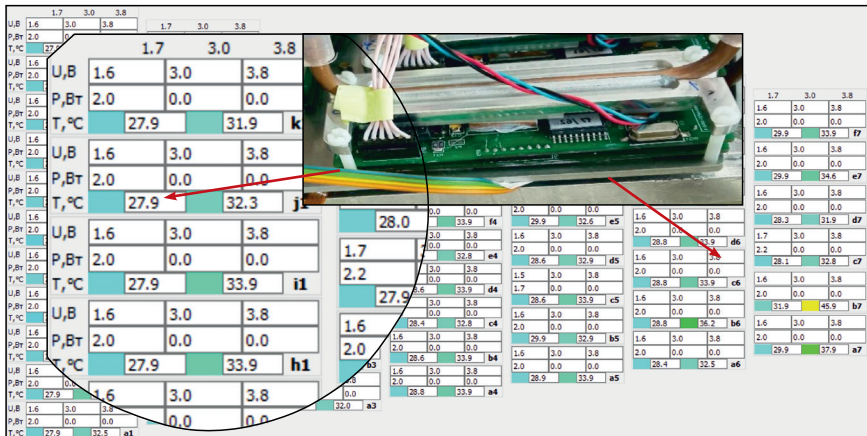


Рис. 11. Окно программы с отображением параметров для имитаторов карт электроники считывания

Дополнительно контролировалась температура самих имитаторов карт электроники. Окно программы контроля температуры для 62 карт представлено на рис. 11.

Измерения проводились при двух условиях:

1) при охлаждении электроники водой с $T = 17^\circ\text{C}$ (T_2), охлаждении корпуса ROC-камеры водой с $T = 25^\circ\text{C}$ (T_1), $T_{\text{air}} - \sim 23^\circ\text{C}$;

2) при охлаждении электроники водой с $T = 19^\circ\text{C}$ (T_2), охлаждении корпуса ROC-камеры водой с $T = 22^\circ\text{C}$ (T_1), $T_{\text{air}} - \sim 23^\circ\text{C}$;

Случай 1. Ниже будут представлены значения температуры со всех датчиков, расположенных на различных частях ROC-камеры. На рис. 12 видно изменение температуры в зависимости от времени датчиков тем-

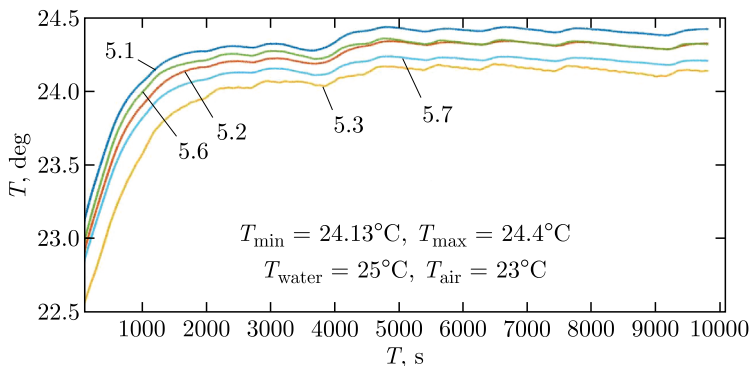


Рис. 12. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на пьедоальной плоскости ROC-камеры

пературы, установленных на педовой плоскости ROC-камеры. Скорость нагрева практически одинакова для всех датчиков, разброс температуры на датчиках достигает $dT = 0,27^\circ\text{C}$ (ΔT_{PAD}), что вполне укладывается в установленные допуски. Максимальная скорость нагрева наблюдается до 1500 с (25 мин), далее скорость снижается и выходит на плато начиная с 2000 с (~ 33 мин). Небольшие колебания температуры связаны с работой PID-регулятора chillера.

На рис. 13 видно изменение температуры в зависимости от времени на датчиках, установленных на алюминиевом корпусе ROC-камеры. Скорость нагрева практически одинакова для всех датчиков. Разброс температуры на датчиках достигает $dT = 0,6^\circ\text{C}$ (ΔT_{ROC}). Максималь-

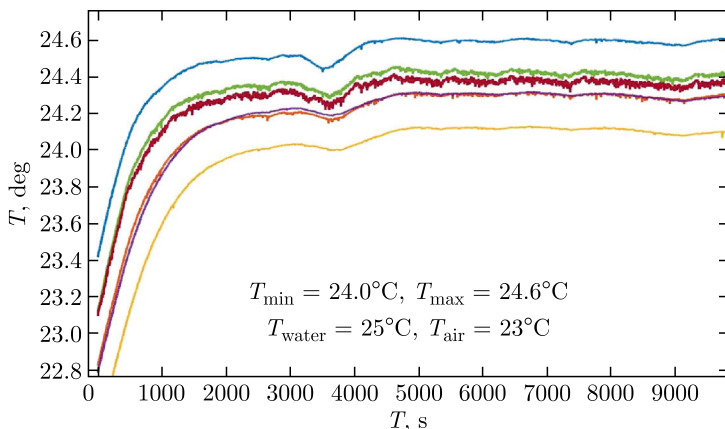


Рис. 13. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на алюминиевом корпусе ROC-камеры

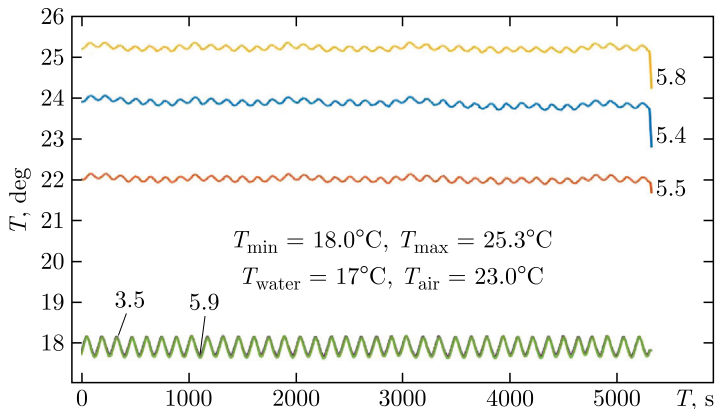


Рис. 14. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на переходной пластине

ная скорость нагрева наблюдается до 1500 с (25 мин), далее скорость снижается и выходит на плато начиная с 2000 с (~ 33 мин). Небольшие колебания температуры тоже связаны с работой PID-регулятора второго чиллера.

На рис. 14 показана температура переходной пластины. Верхние три кривые отображают ситуацию на краях пластины, нижняя кривая передает температуру на приклеенной к основному радиатору части пластины. Разброс значений температуры по площади пластины составляет $dT \sim 7,3^\circ\text{C}$ (ΔT_{ETP}) (от 18 до $25,3^\circ\text{C}$). Снижение температуры на всех датчиках в диапазоне времени ~ 2000–4000 с связано со сбоем работы источника питания для имитаторов карт электроники.

Платы, установленные на краях переходной пластины, имеют температуру в максимуме порядка 30°C . Разброс значений температуры самих карт электроники с микросхемами SAMPA составляет величину $dT = 8^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{SAMPА}} = 29-21$), а их минимальный перегрев относительно температуры охлаждающей воды $T = 17^\circ\text{C}$ — $dT = 4^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{SAMPА}} = 21-17$).

Разброс значений температуры самих карт электроники с микросхемами FPGA составляет величину $dT = 7^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{FPGA}} = 33-26$), а их минимальный перегрев относительно температуры охлаждающей воды $T = 17^\circ\text{C}$ — $dT = 9^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{FPGA}} = 26-17$).

Случай 2. Охлаждение электроники водой с $T = 19^\circ\text{C}$ (T_2), охлаждение корпуса ROC-камеры водой с $T = 22^\circ\text{C}$ (T_1), T_{air} — $\sim 23^\circ\text{C}$. Результаты измерений приведены на рис. 15–17.

Разброс температур на пэдовой плоскости (ΔT_{PAD}) составляет $0,1^\circ\text{C}$ (рис. 15), а на алюминиевом корпусе камеры (ΔT_{ROC}) — $0,2^\circ\text{C}$ (рис. 16).

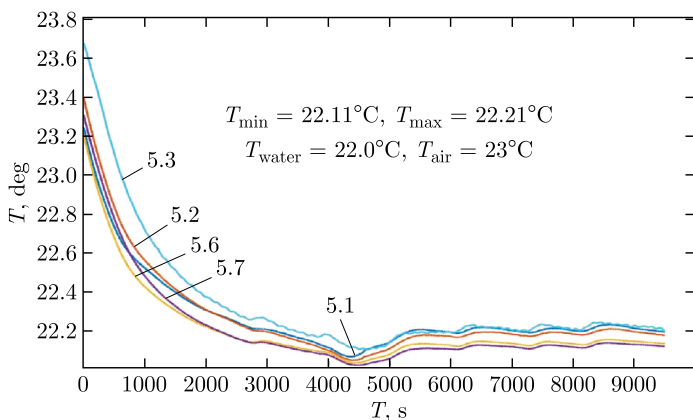


Рис. 15. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на пэдовой плоскости ROC-камеры

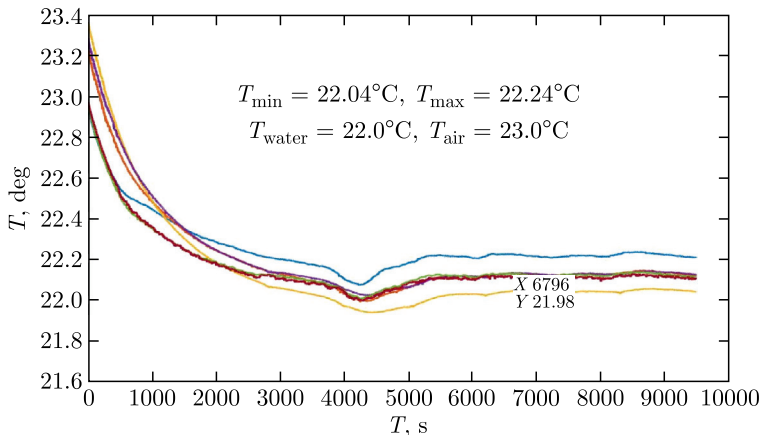


Рис. 16. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на алюминиевом корпусе ROC-камеры

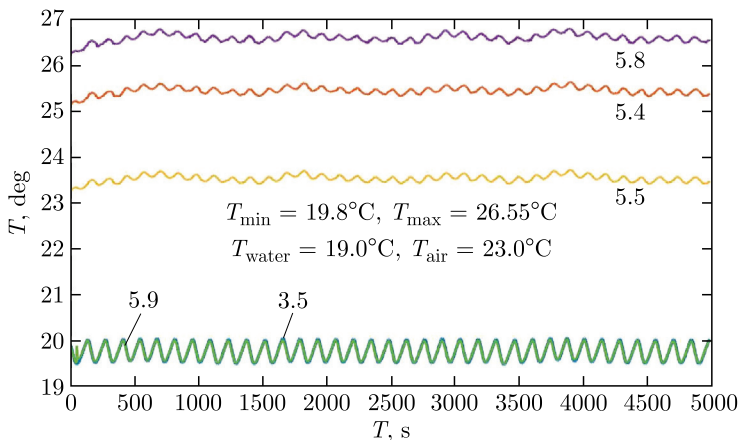


Рис. 17. Зависимость температуры от времени на датчиках температуры на переходной пластине

На рис. 17 показана температура датчиков температуры на переходной пластине. Верхние три кривые отображают температуру на краях пластины, а нижняя передает температуру на приклеенной к основному радиатору части пластины. Разброс значений температуры по площади пластины ($\Delta T_{\text{ЭТР}}$) составляет $\sim 7^\circ\text{C}$ (от $19,8$ до $26,55^\circ\text{C}$).

Платы, установленные на краях переходной пластины, имеют температуру в максимуме порядка $T = 31^\circ\text{C}$. Наибольшие температуры остальных не превышают $22\text{--}28^\circ\text{C}$ при температуре охлаждающей воды $T = 19^\circ\text{C}$. Разброс значений температуры самих карт электроники с микросхемами SAMPA составляет величину $dT = 6^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{SAMPA}} = 28\text{--}22$),

Результаты экспериментов

Случай	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{SAMPA}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{FPGA}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{PAD}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{ROC}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{панели}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$
Первый	25	17	8 (21–29, max = 30)	7 (26–33, max = 33)	0,27 (23,13– 24,40)	0,6 (24,0– 24,6)	7,3 (18,0– 25,3)	33	20
Второй	22	19	6 (22–28, max = 31)	9 (26–35, max = 35)	0,1 (22,11– 22,21)	0,2 (22,04– 22,24)	6,75 (19,80– 26,55)	35	22

а их минимальный перегрев относительно температуры охлаждающей воды $T = 19^\circ\text{C} - dT = 3^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{SAMPA}} = 22-19$).

Разброс значений температуры самих карт электроники с микросхемами FPGA составляет величину $dT = 9^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{FPGA}} = 35-26$), а их минимальный перегрев относительно температуры охлаждающей воды $T = 19^\circ\text{C} - dT = 7^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{FPGA}} = 26-19$).

В таблице приведены результаты всех измерений.

Видно, что чем ближе температура воды для охлаждения корпуса ROC-камеры к температуре окружающей среды, тем меньше разброс температур на педовой плоскости.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Все граничные условия в расчетной части соответствуют экспериментальным. Оценочные расчеты для стационарного теплового режима в Autodesk Inventor Nastran (2022 г.) показали следующие результаты для

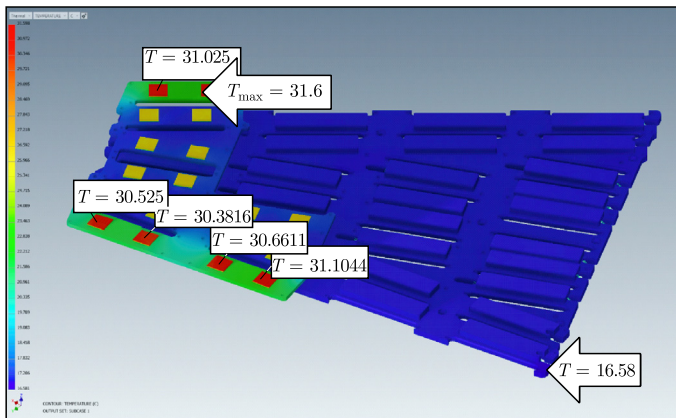


Рис. 18. Результаты моделирования стационарного теплового режима радиатора охлаждения электроники считывания в узкой части ROC-камеры при температуре воды $T = 17^\circ\text{C}$

случаев: 1) охлаждения электроники водой с $T = 17^\circ\text{C}$ (T_2), охлаждения корпуса ROC-камеры водой с $T = 25^\circ\text{C}$ (T_1), $T_{\text{air}} \sim 23^\circ\text{C}$ (рис. 18); 2) охлаждения электроники водой с $T = 19^\circ\text{C}$ (T_2), охлаждения корпуса ROC-камеры водой с $T = 22^\circ\text{C}$ (T_1), $T_{\text{air}} \sim 23^\circ\text{C}$ (рис. 19).

Результаты моделирования стационарного теплового режима показали $T_{\text{max}} = 31,6^\circ\text{C}$ на радиаторе узкой части ROC-камеры при темпе-

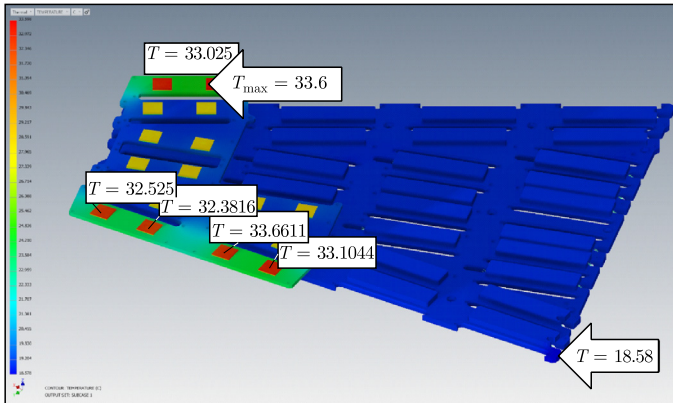


Рис. 19. Результаты моделирования стационарного теплового режима радиатора охлаждения электроники считывания в узкой части ROC-камеры при температуре воды $T = 19^\circ\text{C}$

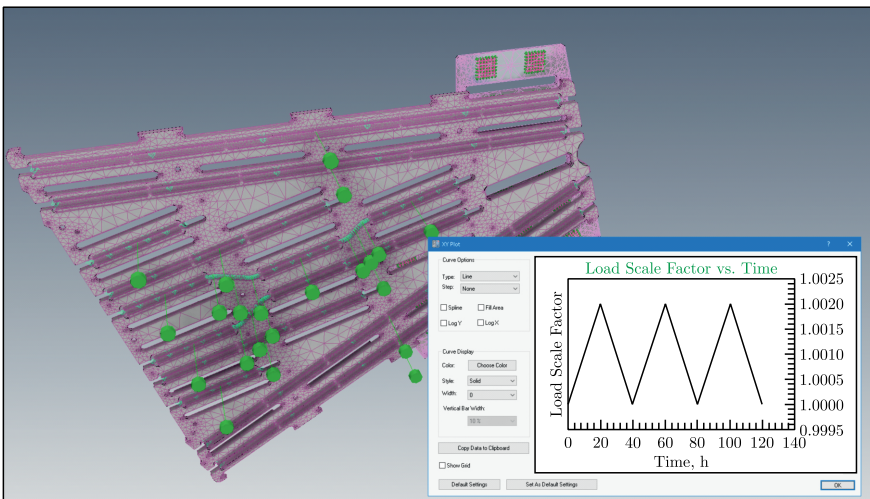


Рис. 20. Результаты моделирования нестационарного теплового режима радиатора охлаждения электроники считывания в узкой части ROC-камеры

ратуре воды 17°C и $T_{\max} = 33,6^{\circ}\text{C}$ при температуре воды 19°C , что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Большой интерес представляют расчеты для нестационарного теплового режима с попыткой оценить влияние колебания температуры на входах контуров СВО, связанного с режимом работы чиллера (рис. 20 и 21). Температурный режим был задан по определенному алгоритму, имитирующему работу чиллера.

В нестационарном режиме наблюдаются колебания температуры для двух случайно взятых точек в коридорах: $dT = 0,3^{\circ}\text{C}$ для точки 1 (node 1) и $dT = 0,4^{\circ}\text{C}$ для точки 4 (node 4) (см. рис. 22 и 23).

Таким образом, результаты моделирования показывают, что предложенная СВО имеет определенные недостатки, связанные с особенностями рабочего режима чиллера.

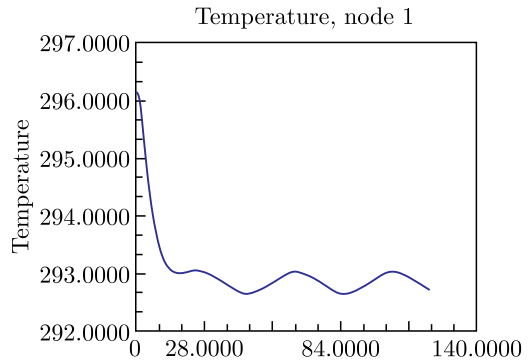
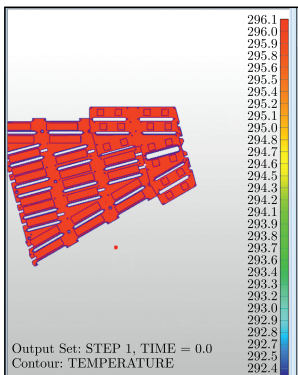


Рис. 21. Результаты моделирования нестационарного теплового режима радиатора охлаждения электроники считывания в узкой части ROC-камеры

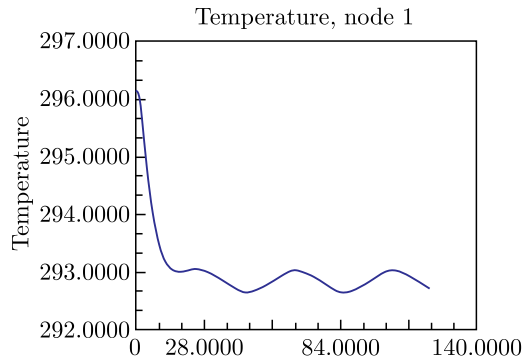
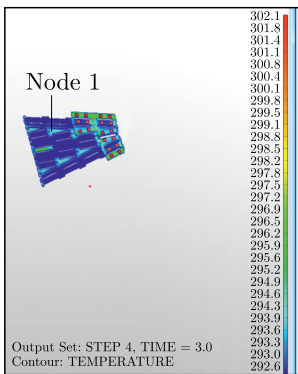


Рис. 22. Случайная точка в теле радиатора — node 1

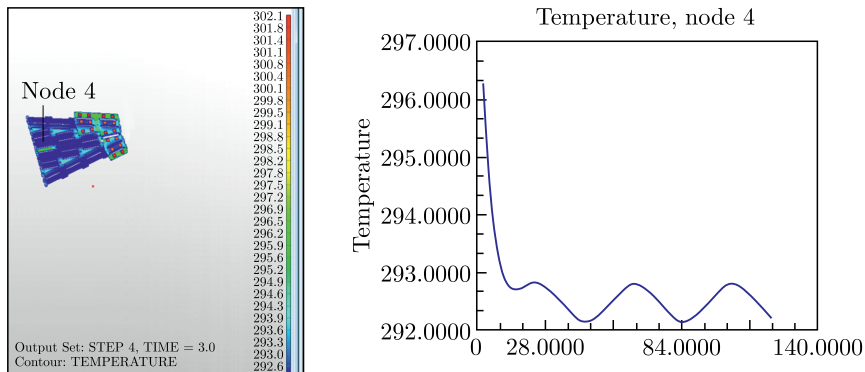


Рис. 23. Случайная точка в теле радиатора — node 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан стенд для экспериментального исследования охлаждения РОС-камеры с электроникой считывания. Приведены результаты измерений различных режимов охлаждения РОС-камеры и имитаторов карт электроники считывания. Полученные экспериментальные данные нагрева плат электроники считывания показали следующее.

- Минимальный перегрев плат с микросхемами SAMPA при хорошем качестве их монтажа составляет величину $dT = 3\text{--}4^\circ\text{C}$ относительно температуры воды. На практике в зависимости от качества монтажа плат на радиаторы (термопаста + прижим) их перегрев может достигать до 10°C . На краях переходной пластины максимальный перегрев может достигать до $12\text{--}13^\circ\text{C}$.

- Минимальный перегрев плат с микросхемами FPGA при хорошем качестве их монтажа составляет величину $dT = 7\text{--}9^\circ\text{C}$ относительно температуры охлаждающей воды. На практике их перегрев может достигать до 16°C в зависимости от качества монтажа.

- Несколько карт на переходной пластине (на ее краях) нагреваются до температуры 35°C (max), что не влияет на их работоспособность и не сильно влияет на величину теплового потока, направленного от них на пэдтовую плоскость самой камеры.

Показана эффективность применения двухконтурной СВО: один контур — для карт электроники считывания (с более низкой температурой воды), а второй — для корпуса РОС-камеры. Показано, что в этом случае распределение температуры по пэддовой плоскости камеры не превышает $dT \leq 0,1^\circ\text{C}$ (при совпадении температуры воды для стабилизации температуры корпуса камеры с температурой воздуха вокруг нее), что удовлетворяет требованиям к разбросу температуры газовой смеси Ar/CH_4 (90 : 10) в дрейфовом объеме ТРС ($\leq 0,5^\circ\text{C}$).

Экспериментальные результаты коррелируют с результатами расчетов компьютерного моделирования, что позволяет оптимизировать параметры СВО РОС-камеры и карт электроники считывания путем моделирования.

Авторы выражают благодарность А. А. Рымшиной и В. А. Самсонову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abraamyan Kh. U., Afanasiev S. V., Alfeev V. S., Anfimov N. et al.* The MPD Detector at the NICA Heavy-Ion Collider at JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 628. P. 99–102.
2. *Alme J., Andres Y., Appelshäuser H., Bablok S. et al.* The ALICE TPC, a Large 3-Dimensional Tracking Device with Fast Readout for Ultra-High Multiplicity Events // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 622. P. 316–367.
3. *Averyanov A., Bajajin A., Chepurnov V., Chernenko S. et al.* Time-Projection Chamber for the MPD NICA Project // Proc. of Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, Russia, Feb. 24 – March 1, 2014; *Averyanov A., Bajajin A., Chepurnov V., Chernenko S. et al.* // J. Instrum. 2014. V. 9. P. C09036.
4. *Averyanov A., Bazhazhin A., Chepurnov V. et al.* TPC Status for MPD Experiment of NICA Project // Proc. of Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, Russia, Feb. 27 – March 3, 2017; *Averyanov A., Bazhazhin A., Chepurnov V. et al.* // J. Instrum. 2017. V. 12. P. C06047.
5. *Peisert A., Sauli F.* Drift and Diffusion of Electrons in Gases: A Compilation. CERN 84-08 Experimental Physics Division. 1984.