

Термостабилизация плоскости считывания время-проекционной камеры ТРС установки MPD ускорительного комплекса NICA

А.С. Федотов, И.А. Зур, А. Кунц, Я. Галкин, А. Шиш, В.Г. Сенкевич, С.А. Мовчан, Г.В.
Мещеряков, А.А. Макаров, И.А. Балашов, Ю.А. Федотова, М.А. Медведева, Ю.В. Шафаревич,
Е.Е. Шманай, В. Чеховский

Докладчик Федотов А.С., постдок

Мотивация

- Однородность температурного поля в TPC на CERES* $\pm 0,2$ °C, на ALICE**,*** $\pm 0,1$ °C, на STAR, возможно, $\pm 0,5$ °C.

Задачи

- Подготовка оборудования для измерения температуры с точностью не хуже $\pm 0,1$ °C;
- Постановка эксперимента по термостабилизации пэдовой плоскости ROC-камеры при включенной электронике считывания

*Bonneau P., Bosteels M. **Liquid cooling systems** (LCS2) for LHC detectors, 1999

Popescu S., Frankenfeld U., Schmidt H.R. **Thermal influences of the front-end electronics on the Alice TPC readout chamber // IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004. Rome, Italy: IEEE, 2004. Vol. 1. P. 512–516.

***Alme J. et al. **The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Vol. 622, № 1. P. 316–367.

Калибровка датчиков Pt 100

Калибровка датчиков Pt100

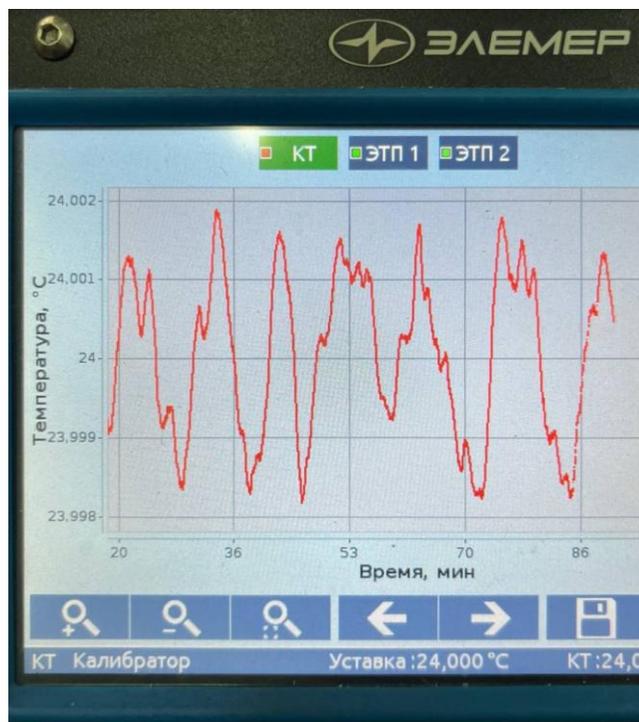
Для поддержания однородности температуры в пределах $\pm 0,1$ К необходимо иметь датчики с высоким разрешением (рассматриваем $0,03$ К).

ГОСТ: погрешность $\Delta T_{Pt100} = \pm (0,1 + 0,0017 |T|)$ °С, для температуры $T = +30$ °С это $\pm 0,15$ °С

Необходимо провести калибровку

Калибратор ЭЛЕМЕР, стабильность $\pm 0,002$ °С

Измеритель Agilent DAQ 34970A с 3-к мультимплексором 34901A



Временная зависимость температуры калибратора Датчики в парафине перед погружением в калибратор

Калибровка датчиков Pt100

Калибровка датчиков будет проводиться полиномом порядка n :

$$P_i(a[0]_i, a[1]_i, \dots, a[k]_i, \dots, a[n]_i, T_i) = a[0]_i + a[1]_i \cdot T_i + \dots + a[k]_i \cdot T_i^k + \dots + a[n]_i \cdot T_i^n$$

где $a[k]_i$ – коэффициенты для i -го датчика, $k = 1..n$, n – порядок полинома.

Поиск коэффициентов проводится по минимизации отклонения показаний датчика от эталона:

Или

Среднеквадратичное отклонение L^2 :

$$L^2 = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_i(T_i^j) - T_{etalon}^j)^2}$$

Норма Чебышева L^∞ :

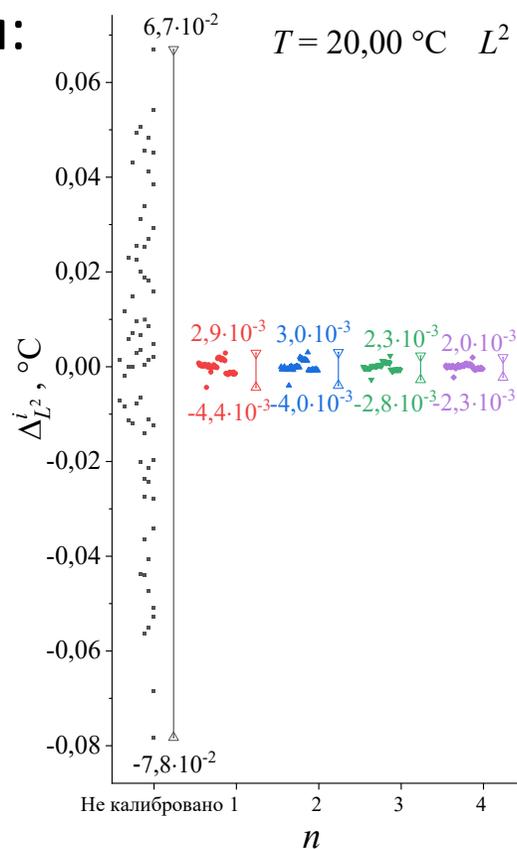
$$L^\infty = \max_j |P_i(T_i^j) - T_{etalon}^j|$$

Калибровка датчиков Pt100

Разброс отклонений датчиков от среднего при различной степени калиб. полинома n

Минимизация
отклонения:

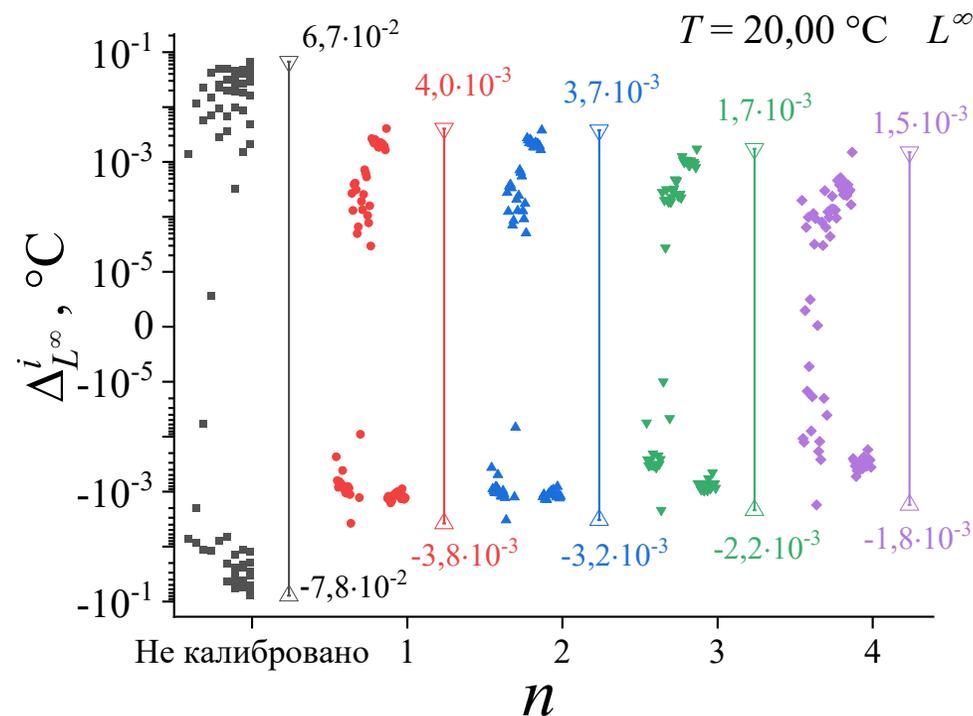
Линейный
масштаб:



Лог-лин-лог
масштаб:

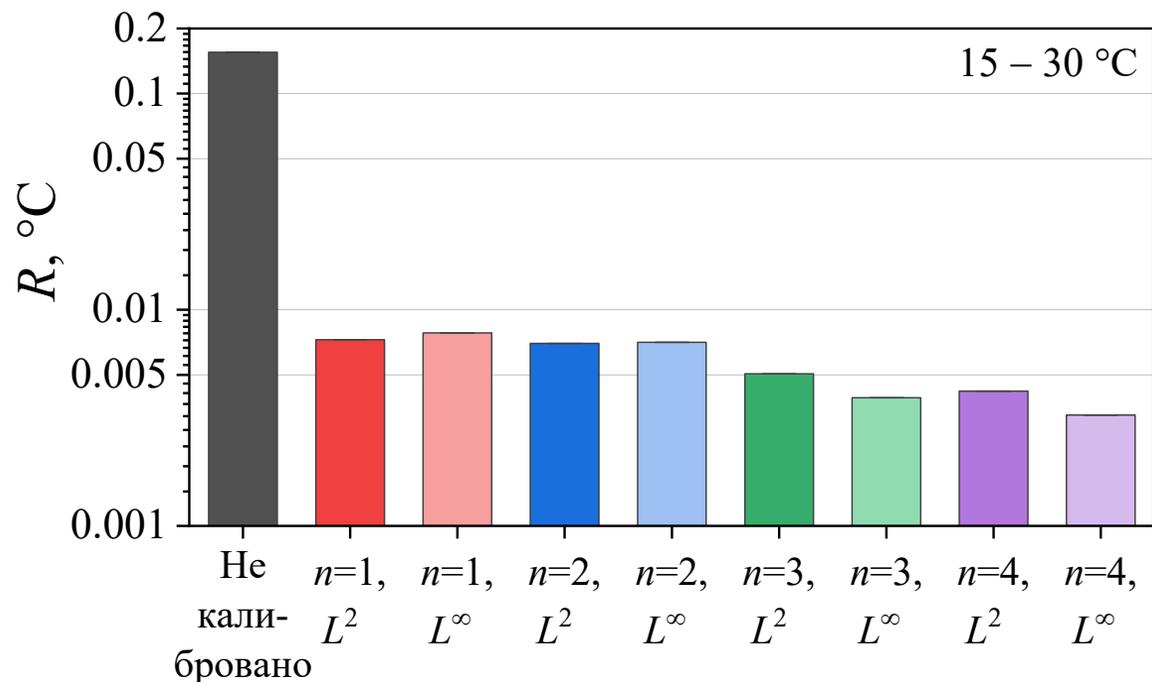
Лог-лин-лог
масштаб:

Минимизация нормы Чебышева:



Калибровка датчиков Pt100

Сужение размаха выборки показаний датчиков после калибровки:



Результаты:

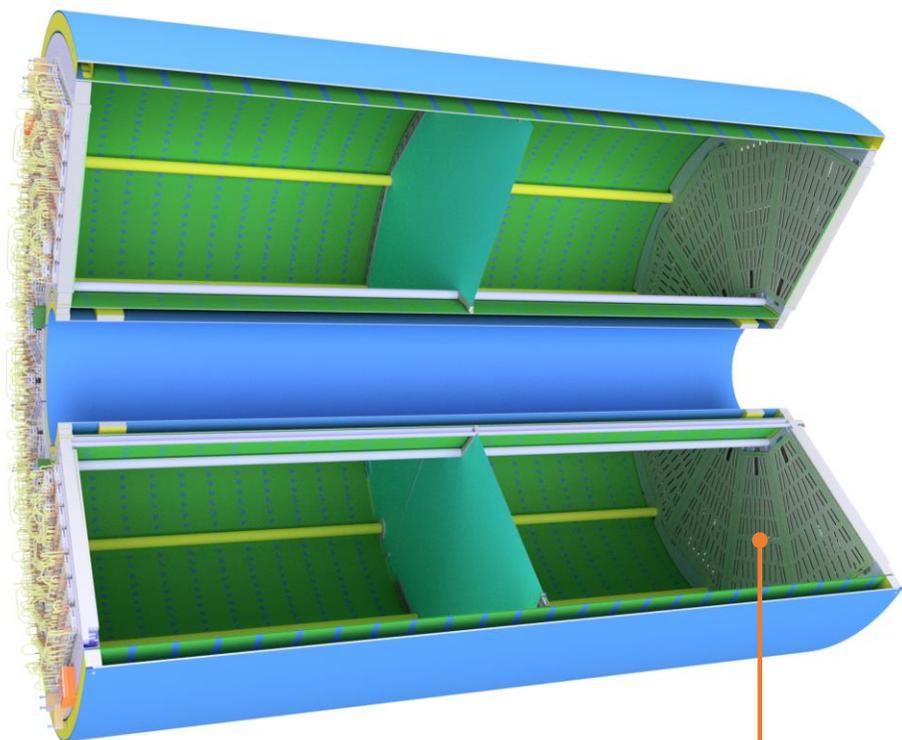
- Калибровка линейной функцией снижает размах показаний выборки датчиков в 19 раз с 0,145 °C до 0,0073 °C;
- При степени полинома $n > 2$ поиск коэффициентов имеет смысл осуществлять по критерию L^∞ . Для $n = 4$ размах выборки сужается на 25 % по сравнению с критерием минимизации L^2 : до 0,0033 °C.

Размах выборки R до и после калибровки полиномами степени n при различной норме L

Термостабилизация ROC-камеры (эксперимент)

Термостабилизация ROC-камеры

Пэд-овые плоскости контактируют с рабочей газовой смесью TPC



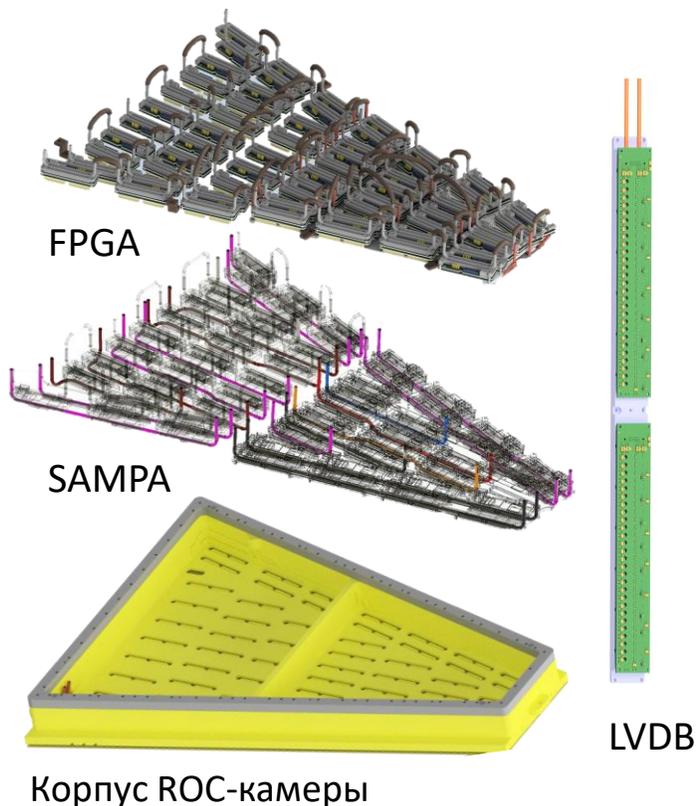
TPC в разрезе

Пэд-овые плоскости ROC-камер

Электроника ROC-камеры

$P_{LVDB} = 352$ Вт, $P_{SAMPDA} = 126$ Вт, $P_{FPGA} = 158$ Вт

Контроллер $P \approx 120$ Вт всего $P \approx 760$ Вт



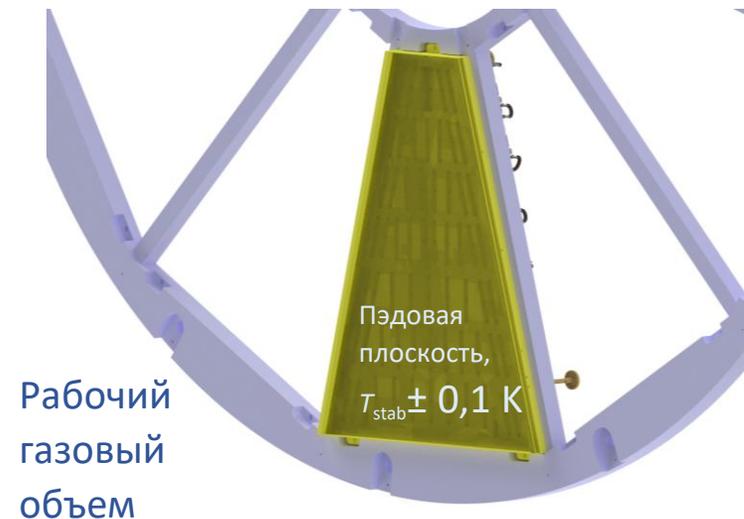
FPGA

SAMPDA

Корпус ROC-камеры

LVDB

Позволит ли система охлаждения ROC-камеры создать **однородную температуру $\pm 0,1$ К** на пэд-овой плоскости?



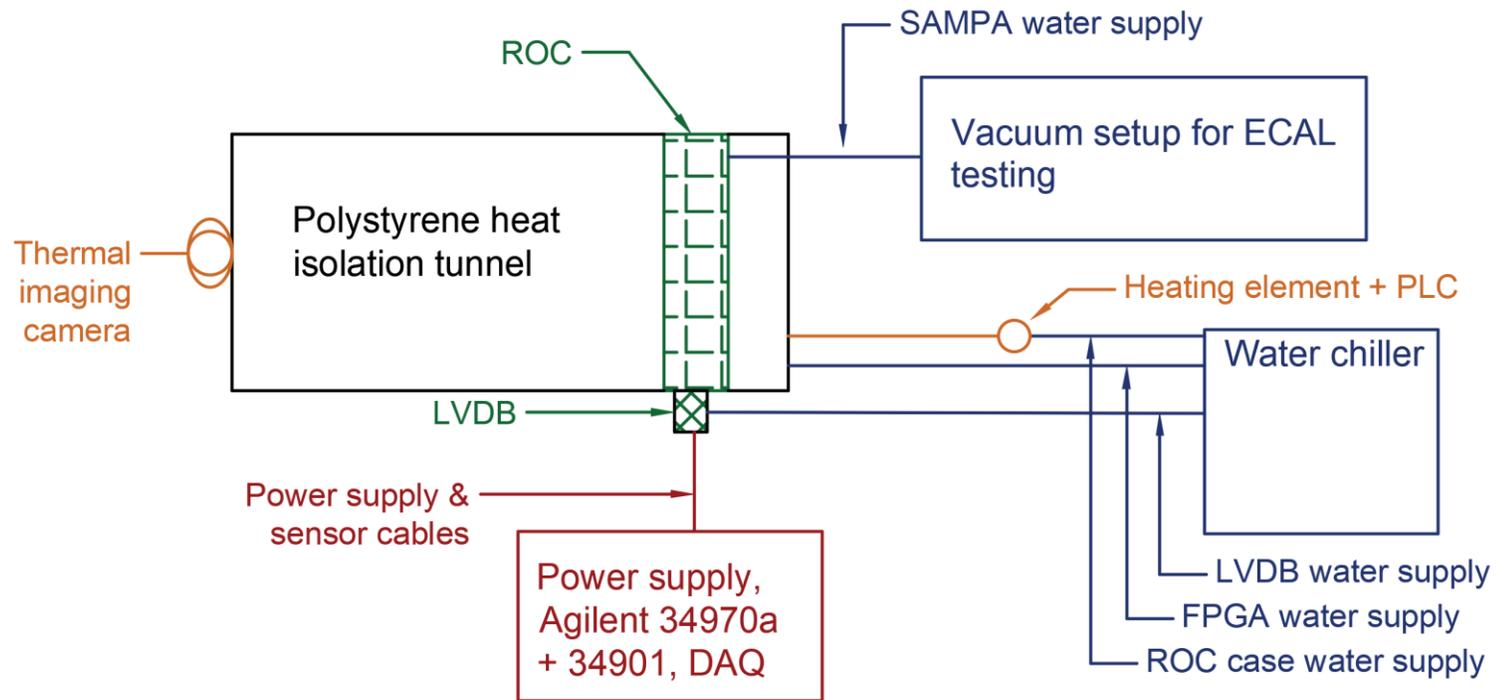
Рабочий газовый объем

Пэд-овая плоскость,
 $T_{stab} \pm 0,1$ К

Термостабилизация ROC-камеры

Эксперимент:

- Вода подавалась на 4 подконтра разделённо;
- ROC-камера теплоизолирована от окружения;
- Кондиционер поддерживал температуру постоянной;
- Тепловизор калибровался коэффициентом серости по датчикам Pt100, чувствительность сенсора 0,03 К.



Экспериментальная установка

https://rutube.ru/video/private/fc768c02ae8ce14493c1f14abc95949b/?p=MdkkueBE90_rzah2Bd1gRA&r=plwd

Термостабилизация ROC-камеры

Шкаф электроники:

- CAEN БП SY5527 + A2517 Power Supply для LVDB;
- АЦП Pt 100 Agilent DAQ 34970A с 3-к мультиплексором 34901A (точность 0.001 °C).

Оборудование:

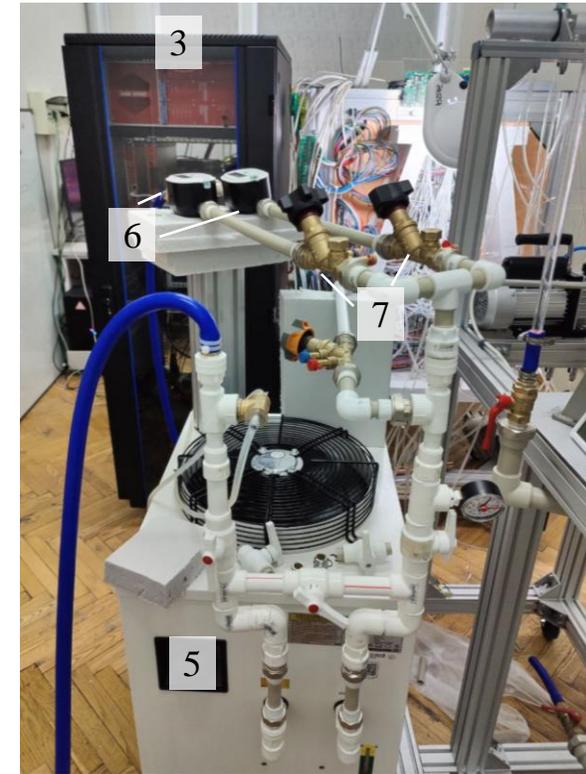
- ультразвуковые расходомеры WM9100-ED (погрешность 0.01 м³/ч);
- датчики давления Aplisens PC-28 (погрешность 0.1 Па);
- Тепловизор Flir E8 (0.03 °C/бит)



(а)



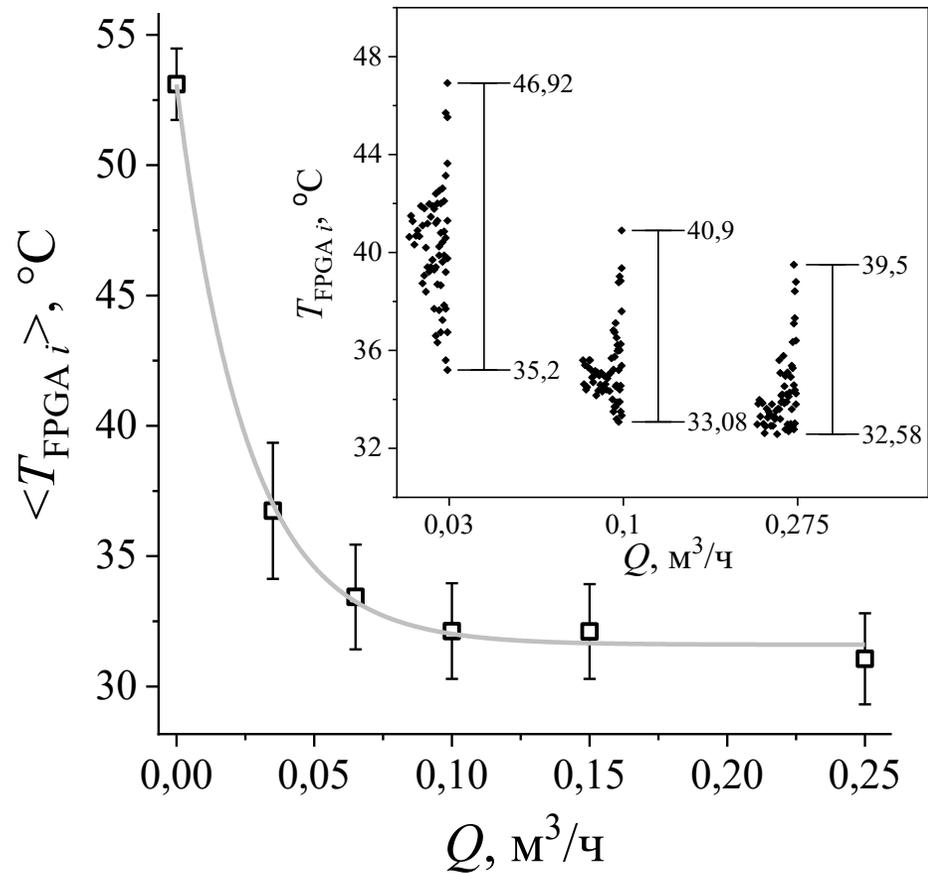
(б)



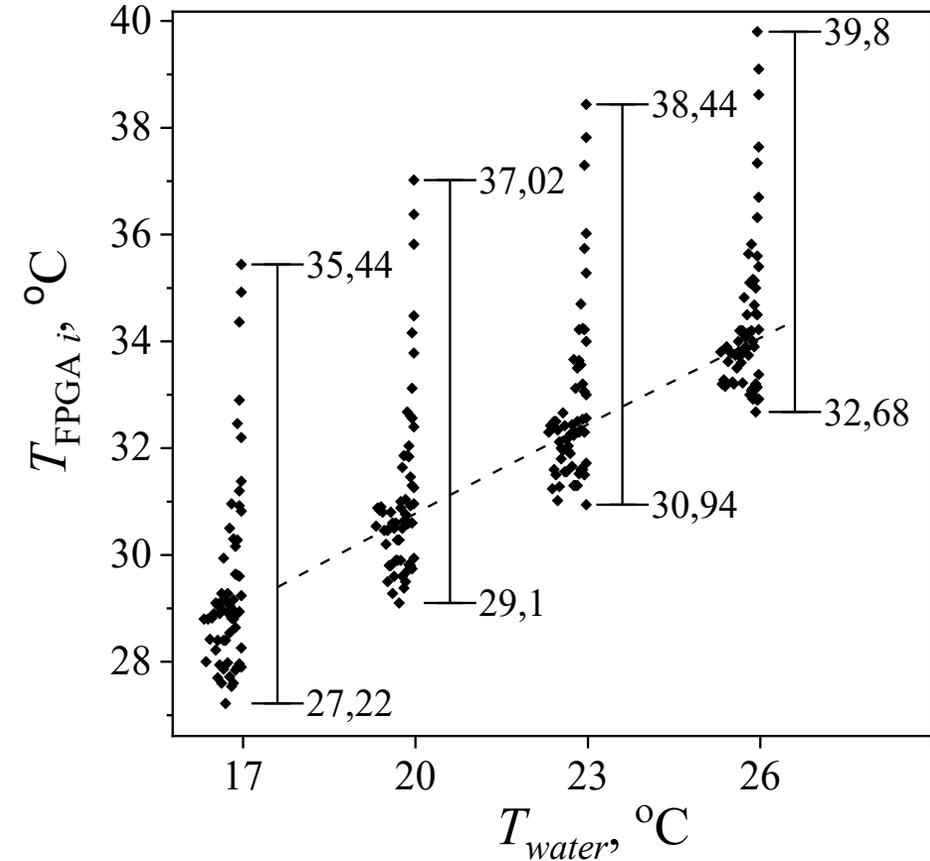
(в)

1 – полистироловый короб; 2 – камера ROC (виден контур FPGA);
3 – шкаф электроники CAEN; 4 – испытательный стенд; 5 – промышленный чиллер; 6 – ультразвуковые расходомеры; 7 – балансировочные краны

Температура FPGA

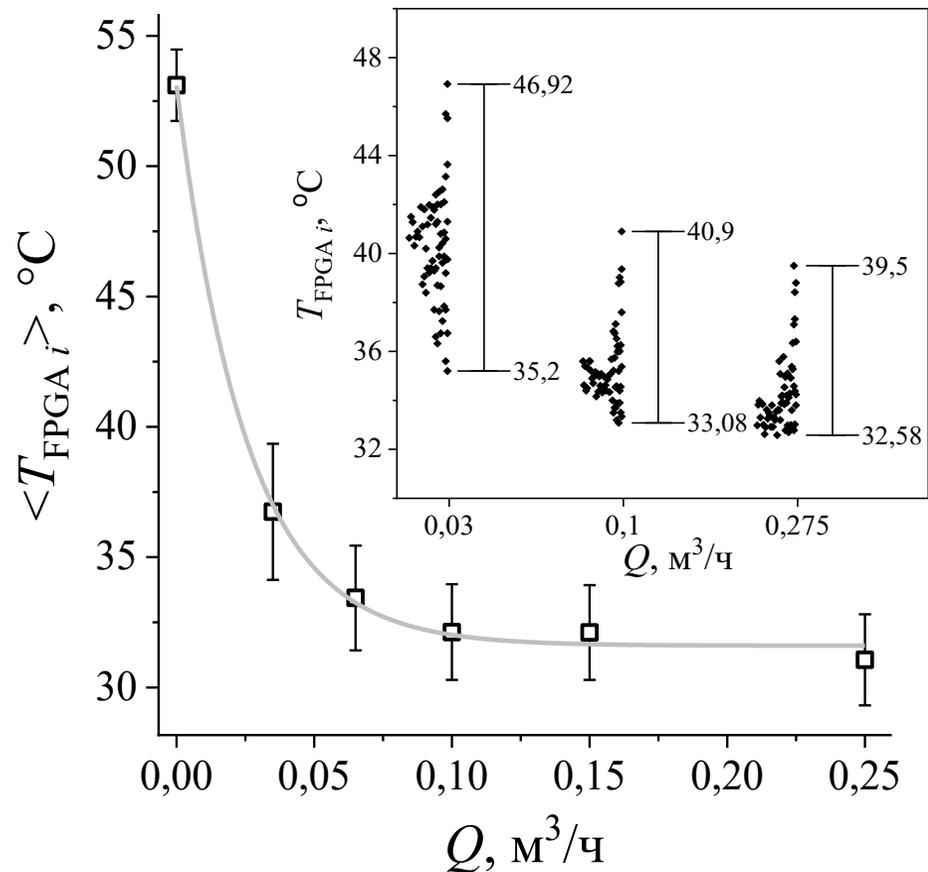


Усредненная зависимость температуры на FPGA $\langle T_{FPGA\ i} \rangle$ от расхода Q при входной температуре воды 26 °C, вставка – распределение показаний датчиков



Распределение температуры $T_{FPGA\ i}$ при **различной температуре** воды на входе в радиаторы T_{water} при номинальном расходе Q_{FPGA}

Температура FPGA



Из рисунка видим, что температура FPGA слабо зависит от расхода при превышении достижения порогового $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Поскольку номинальный расход составляет $Q_{FPGA} = 0,25 \text{ м}^3/\text{ч}$, можно сделать вывод, что небольшие динамические изменения в его окрестности не повлияют на температуру плат.

Таким образом, для контроля T_{FPGA} через расход понадобится слишком значительное отклонение от номинального расхода Q_{FPGA} , что может привести к нарушению режима *leakless*.

Усредненная зависимость температуры на FPGA $\langle T_{FPGA_i} \rangle$ от расхода Q при входной температуре воды $26 \text{ }^\circ\text{C}$, вставка – распределение показаний датчиков

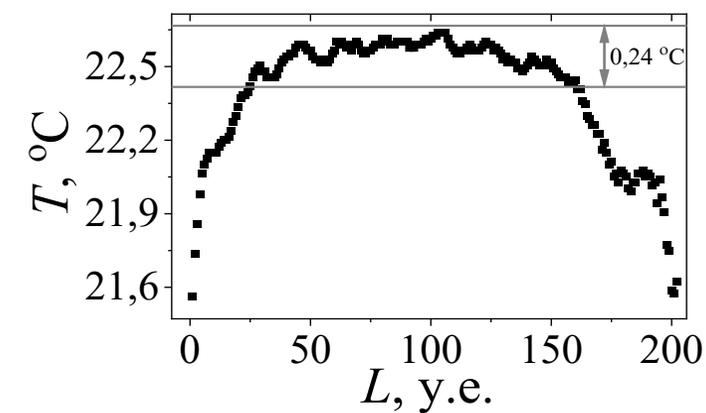
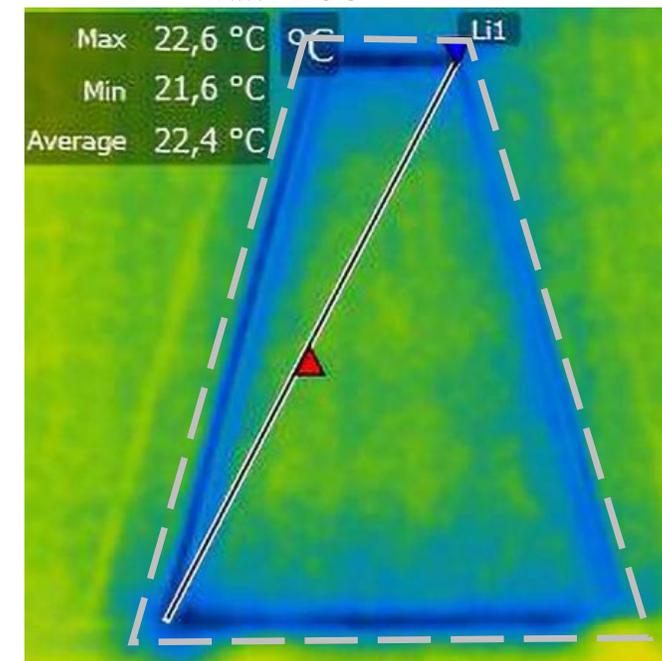
Термостабилизация ROC-камеры

Расход воды на контур корпуса ROC составлял $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. На вход в контуры FPGA, SAMPA, LVDB и корпуса ROC подавалась вода при температуре $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом наблюдался перегрев центральной части пэдовой плоскости относительно периферийной.

Как видно из рисунка, температура в центре пэдовой плоскости составляет около $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ при такой конфигурации, а перепад температуры достигает $\pm 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, что существенно выше целевого значения в $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Это связано с тем, что платы SAMPA нагревают центральную часть корпуса ROC выше входной температуры воды.

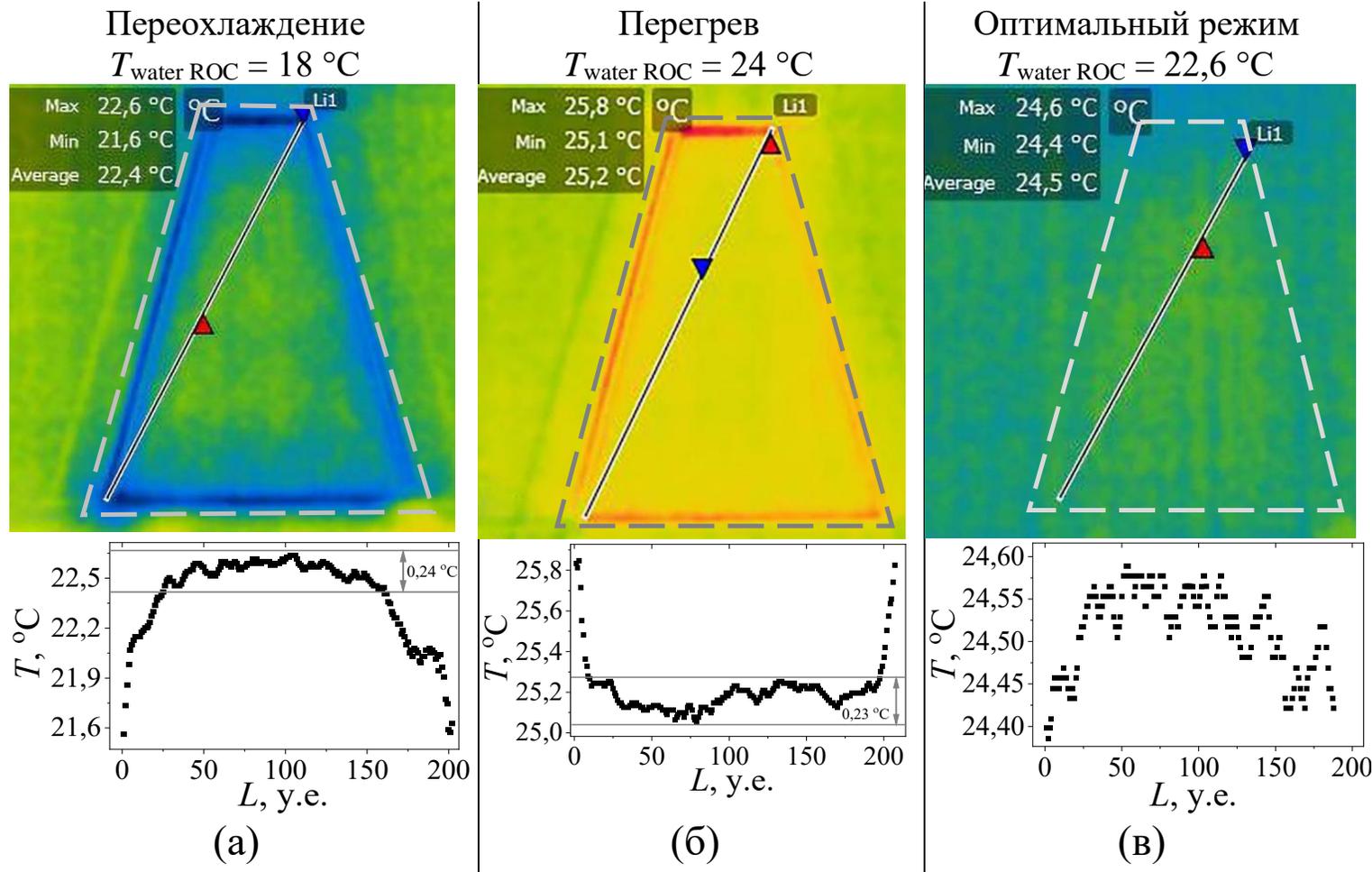
Тепловизионные изображения пэдовой плоскости и распределения температуры вдоль линии при различной температуре воды T_{water} в контуре корпуса ROC-камеры: (a) – $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Переохлаждение
 $T_{\text{water ROC}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$



(a)

Термостабилизация ROC-камеры



Используя ТЭН с PID-регулированием удалось установить температуру $T_{water} = 22,6^\circ\text{C}$ на входе в корпус ROC. Полученное распределение температуры отклонялось от среднего на $\pm 0,08^\circ\text{C}$ (рисунок в), что входит в целевой интервал $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Тепловизионные изображения пэдовой плоскости и распределения температуры вдоль линии при различной температуре воды T_{water} в контуре корпуса ROC-камеры: (а) – $18,0^\circ\text{C}$, (б) – $24,0^\circ\text{C}$, (в) – $22,6^\circ\text{C}$

Выводы

Точность термометрии. Индивидуальная калибровка 66 датчиков Pt100 по шести температурным точкам и полиномиальными функциями (оптимизированными по норме L^∞) позволили снизить размах показаний с 0,145 °C до 0,003 °C, обеспечив относительную погрешность измерения лучше чем $\pm 0,01$ °C;

Контроль температуры электроники FPGA. Эксперименты показали, что при расходах воды $\geq 0,1$ м³/ч температурой плат FPGA целесообразно управлять именно входной температурой хладоносителя. Снижение T_{water} с 26 °C до 17 °C уменьшает медианную температуру FPGA с 34 °C до 29 °C, что существенно ниже порогового значения 45 °C и не нарушает режим *leakless*.

Термостабилизация пэдовой плоскости ROC-камеры. При допускающих *leakless* расходах при температуре воды 22,6 °C обеспечена однородность температурного поля пэдовой плоскости $\pm 0,08$ °C, что укладывается в требуемые $\pm 0,1$ °C для TPC.

Практическая значимость. Поставленный эксперимент по термостабилизации подтверждает возможность эксплуатации TPC MPD с «быстрыми» газами при текущей конструкции ROC-камеры и пэдовых плоскостей без заметного вклада температурных градиентов в систематическую погрешность реконструкции треков, а предложенный метод калибровки датчиков Pt100 может быть использован в других экспериментах.

Спасибо за внимание!