

Leakless-система термостабилизации и система термометрии для детектора ТРС

(отчетный семинар за 1-ый год работы постдока)

Федотов А.С., научный сотрудник-постдок
сектора №1 трековых детекторов
отделения №3 НЭОМД ЛФВЭ

Должностные обязанности

1. Проводить **научно-исследовательскую работу** в рамках тематики сектора;
2. Планировать и проводить **теплофизические эксперименты и расчеты**;
3. **Представлять полученные результаты** на международных конференциях, совещаниях коллаборации MPD, семинарах отдела, Лаборатории, а также в виде статей в научных журналах;
4. Руководить бакалаврскими, магистерскими, дипломными работами студентов и аспирантов.

И др.

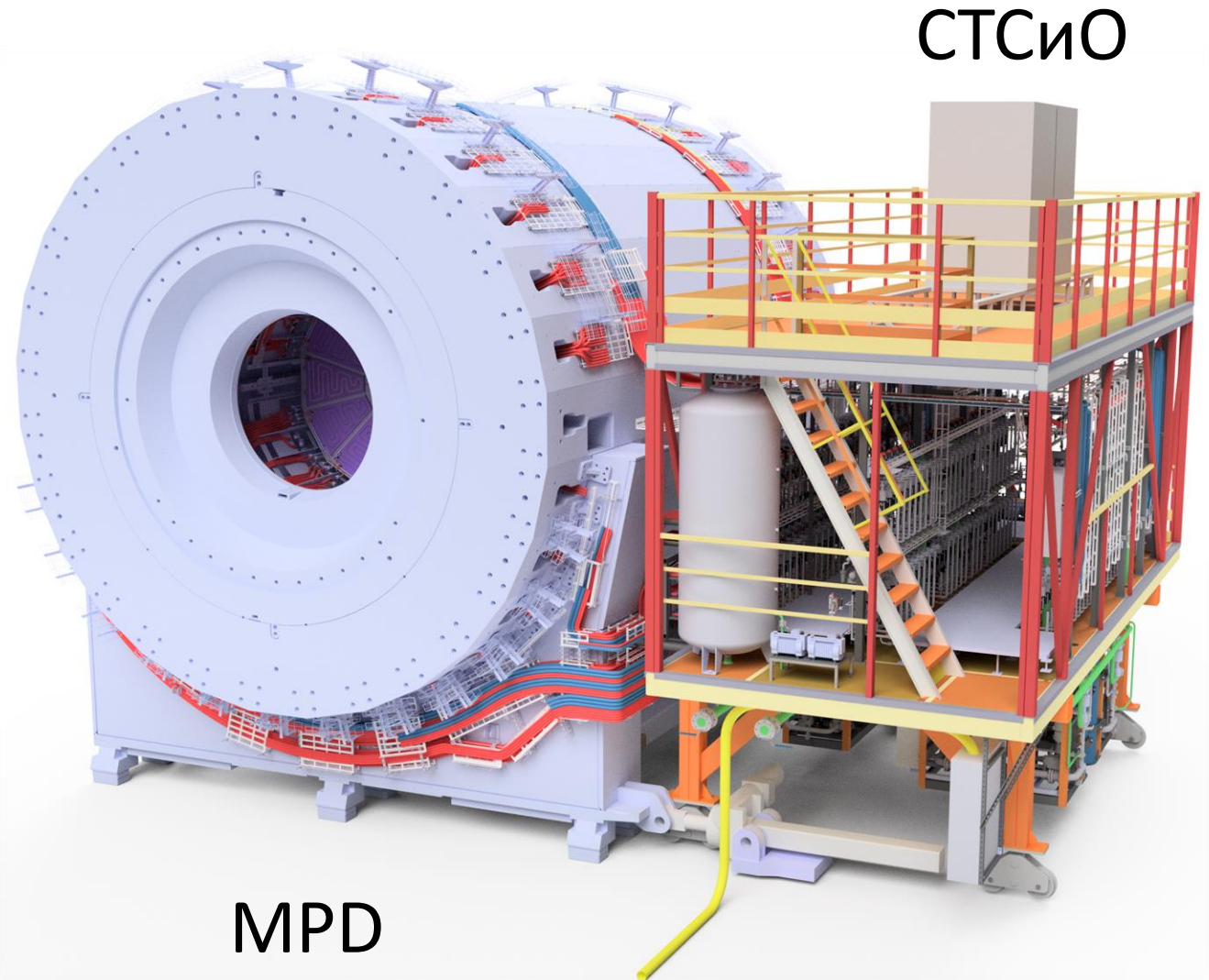
Система термостабилизации и охлаждения

Система термостабилизации и охлаждения (СТСиО) обеспечивает

- охлаждение электроники;
- однородное распределение температуры в рабочем газовом объеме TPC.

Основные особенности:

1. Давление воды ниже атмосферного в любой точке внутри детектора MPD для предотвращения протечек воды;
2. Однородность температурного поля внутри газового объема $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. Высокая степень автоматизации и компьютеризации.



Создание системы термостабилизации

Научно-исследовательские работы:

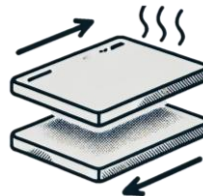
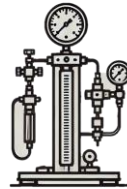
Расчет режимов течения *leakless*

Разработка испытательных стендов

Тестирование элементов системы

Анализ теплообмена между
субдетекторами TOF+ECAL и TPC

Эксперименты по прецизионной
термометрии и термостабилизации



Инженерно-технические работы:

Составление CAD-модели системы

Подбор оборудования

Создание стендов

Закупка оборудования

Изготовление насосных модулей,
коллекторов, шкафов электроники

Монтаж и наладка оборудования

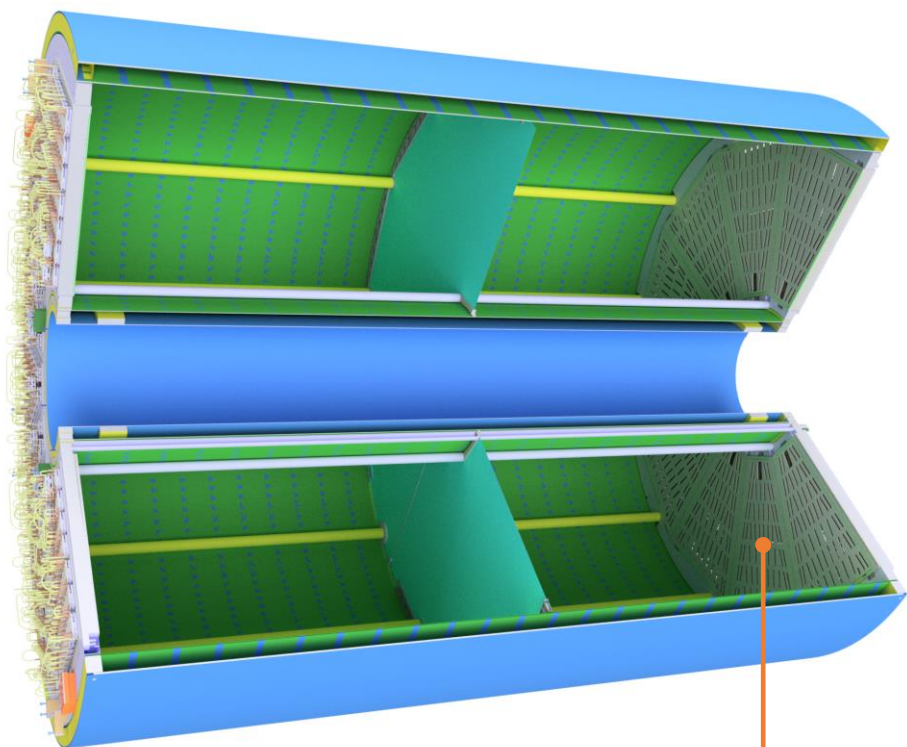
Программирование системы



Термостабилизация камеры ROC (эксперимент)

Термостабилизация ROC-камеры

Пэдовые плоскости контактируют с рабочей газовой смесью TPC



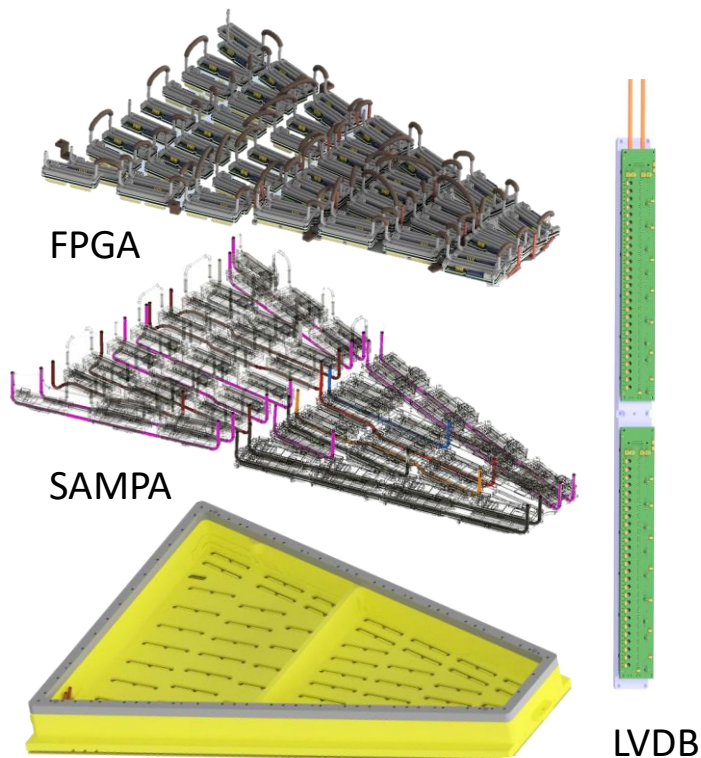
TPC в разрезе

Пэдовые плоскости ROC-камер

Электроника ROC-камеры

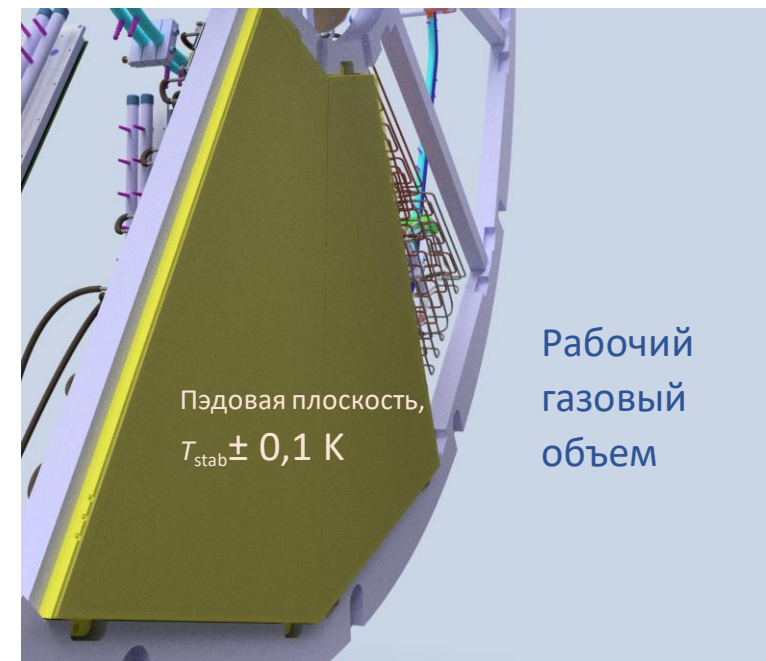
$P_{LVDB} = 352$ Вт, $P_{SAMPA} = 126$ Вт, $P_{FPGA} = 158$ Вт

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



Корпус ROC-камеры

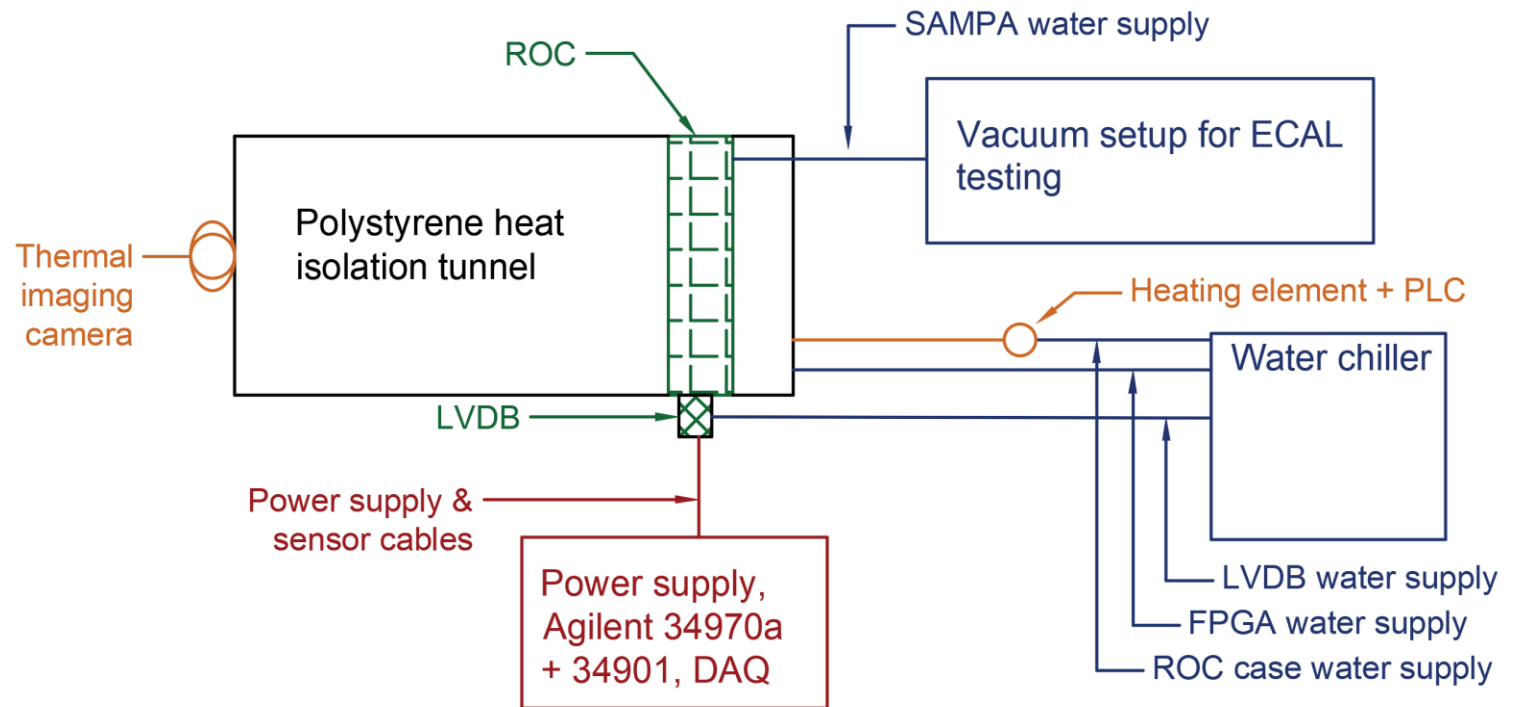
Позволит ли система охлаждения ROC-камеры создать **однородную температуру $\pm 0,1$ К** на пэдовой плоскости?



Термостабилизация ROC-камеры

Эксперимент:

- Вода подавалась на 4 подконтура отдельно;
- ROC-камера была 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=MdkkueBE9O_rzah2Bd1gRA&r=plwd

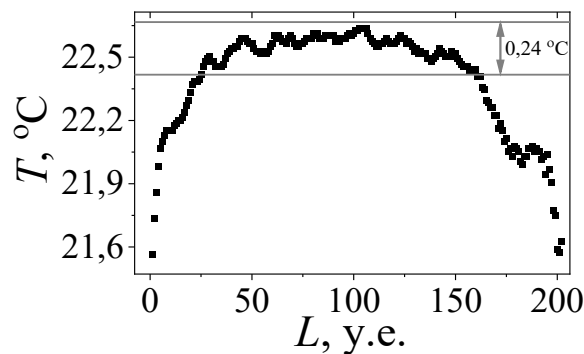
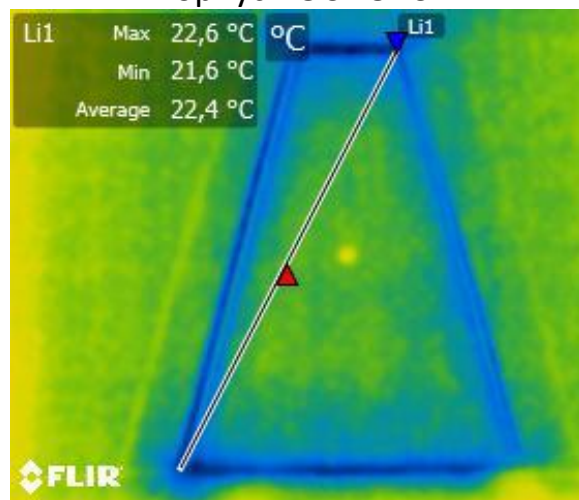
Термостабилизация ROC-камеры

Тепловизионные
фотографии пэдовой
плоскости

Распределение
температуры вдоль секущей
при различной температуре
воды в корпусе ROC-камеры

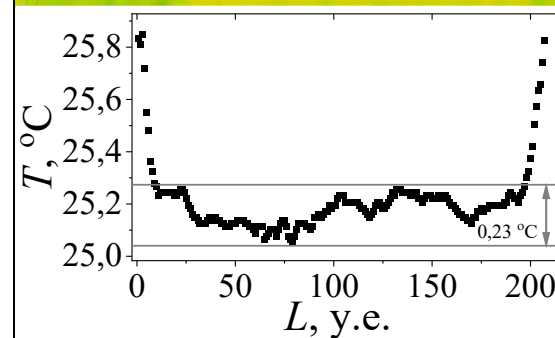
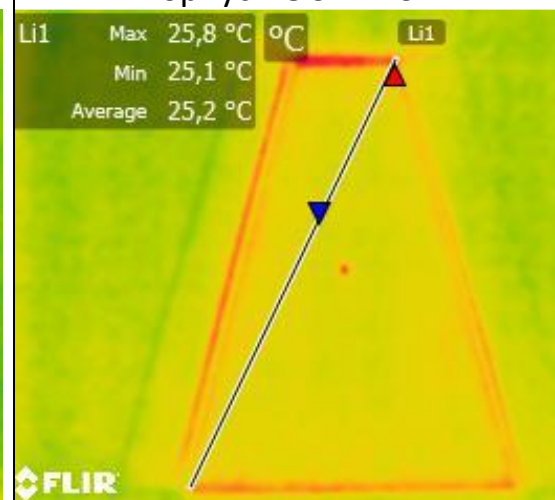
Переохлаждение

Температура воды на входе в
корпус ROC 18 °C



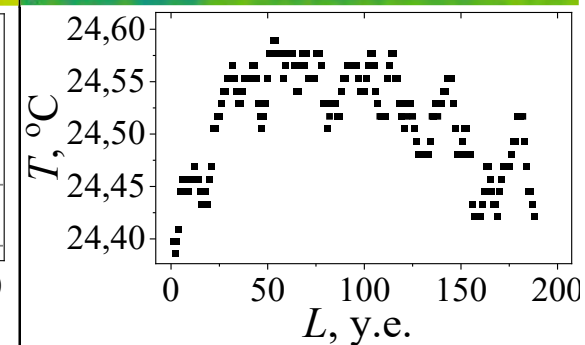
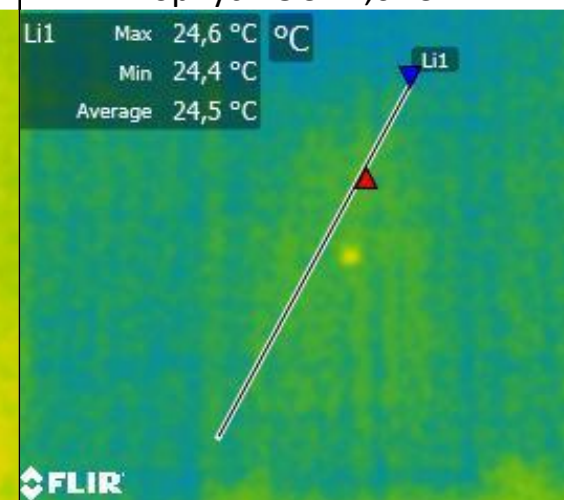
Перегрев

Температура воды на входе в
корпус ROC 24 °C



Оптимальный режим

Температура воды на входе в
корпус ROC 22,6 °C



Термостабилизация ROC-камеры

Результат: Полученное распределение температуры отклонялось от среднего на $\pm 0,08$ °C, что входит в целевой интервал $\pm 0,1$ °C. Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность термостабилизации пэдовой плоскости ROC-камеры.

Вклад постдока: постановка, обработка и анализ эксперимента, подготовка отчетных материалов

Разработка лабораторного стенда для теплофизических задач и отработки алгоритмов управления

Разработка лабораторного стенда

Специфика системы управления СТСиО:

- **Общие циркуляционные насосы** — до 50 управляемых подконтуров питаются от одного насосного модуля, не должно быть конкуренции;
- **Необходима стабильная температура** — нужно отработать управление нагревателями с помощью твердотельных реле и частотных преобразователей;
- **В случае кавитационного закупоривания** необходим алгоритм освобождения подконтура.

Необходима полностью автоматизированная лабораторная установка для тестирования в *leakless*-режиме алгоритмов управления в диапазоне параметров для 116 контуров (для детекторов TPC и ECal)

Разработка стенда

Электроника:
промышленный
панельный
компьютер i5 +
стабильный PLC
Siemens 1500 и
АЦП/ЦАП Siemens

Вакуумный насос
Value VE-115N

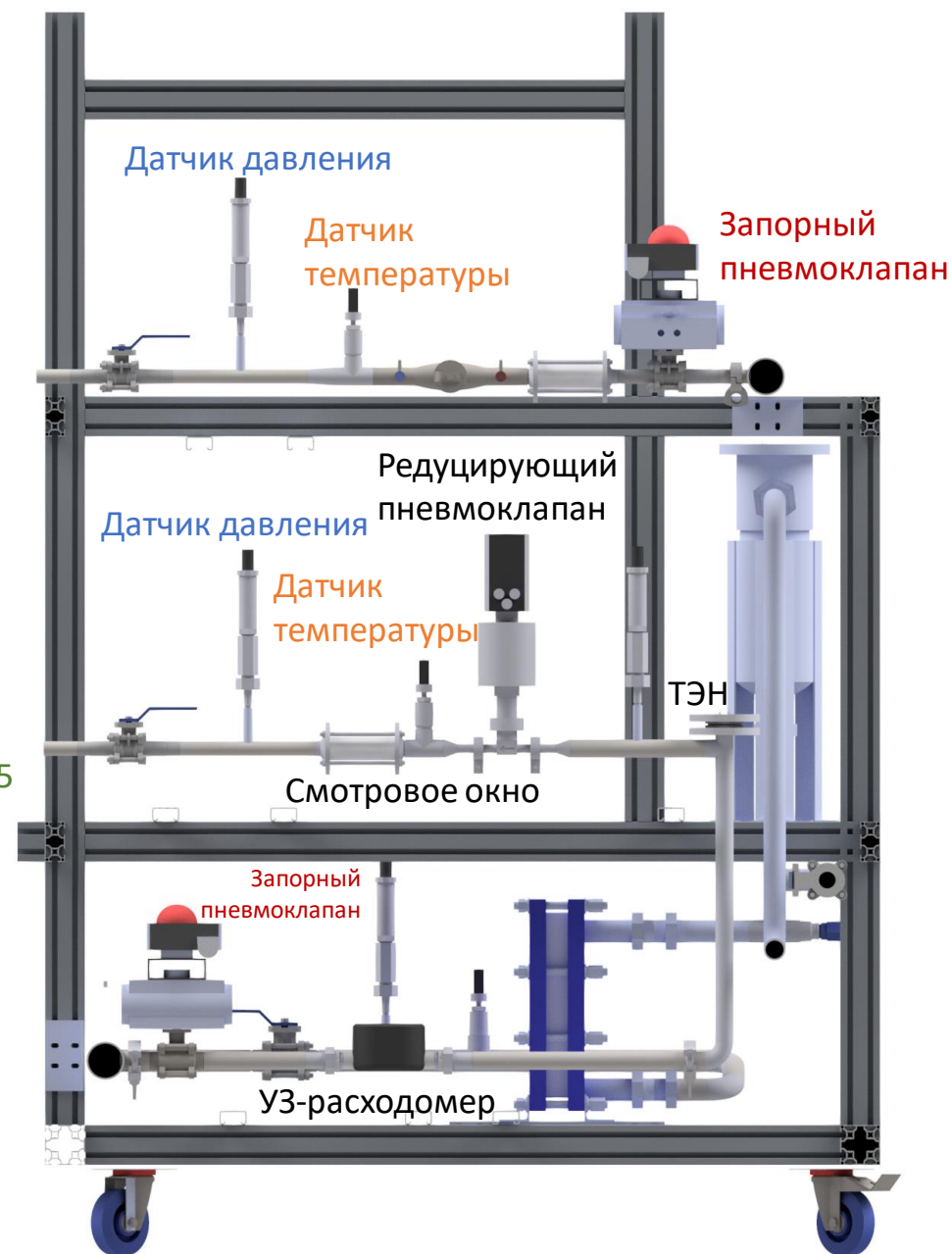
Фильтр механический
Аквабайт АБФ-НЕРЖ-
20ББ

Фильтр химической
водоочистки ХВО ФС 815

ССЕ-3320Е
кондуктометр

Общий циркуляционный
насос Jetex VS 4/7 до 7 м³/ч

Теплообменник ET-
002-1048452 до 6
кВт/(м·К)



Архитектура близка к архитектуре СТСиО



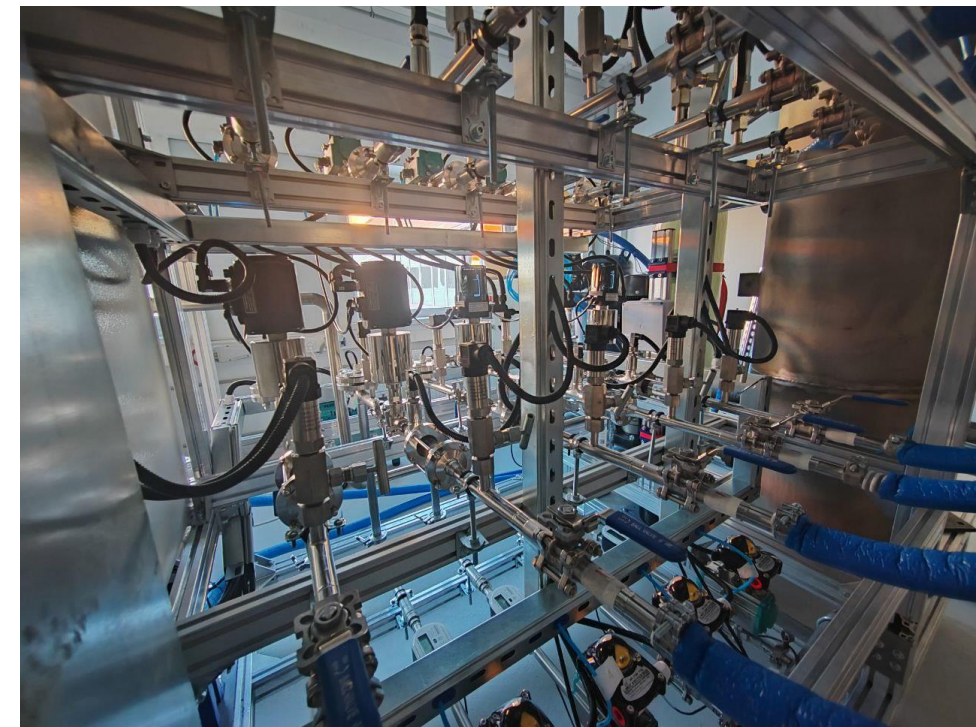
Статус стенда

Планируемые эксперименты:

- Отладка алгоритмов управления связанными контурами;
- Отладка режимов контроля термостабилизации на работающей камере ROC;
- Поиск алгоритмов удаления кавитационных пробок;
- Гидродинамические исследования новых радиаторов (модули синхронизации и контроллеры считывания FEC карт)



Шкаф электроники



Подконтуры с пневмоклапанами, расходомерами, кранами и др.



Статус стенда

Результат: спроектирован и собран лабораторный стенд для исследования гидродинамических и тепловых процессов в *leakless*-системах термостабилизации. Узлы, приборы и архитектура стенда соответствуют системе термостабилизации детекторов TPC и ECAL и доступны для контроля через компьютер/PLC Siemens.

Вклад постдока: схема стенда, техническое задание, заявка на грант Полномочного представителя РБ, программа тестов стенда, поиск и закупка расходомеров и пневматических клапанов у оригинальных китайских производителей

Система термометрии

Калибровка датчиков температуры Pt100

Калибровка датчиков Pt100

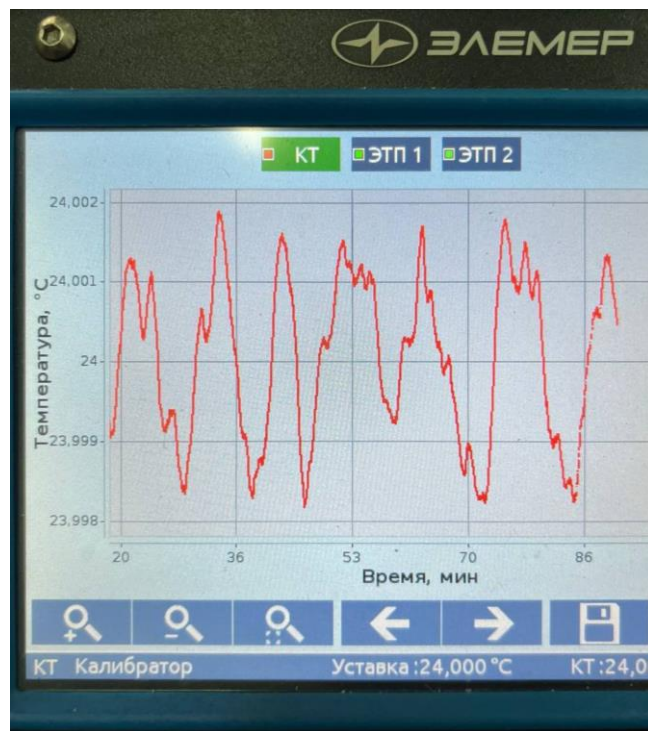
Для поддержания однородности температуры в пределах $\pm 0,1$ К необходимо иметь датчики с высоким разрешением (рассматриваем $0,03$ К).

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

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

Норма Чебышева L^∞ :

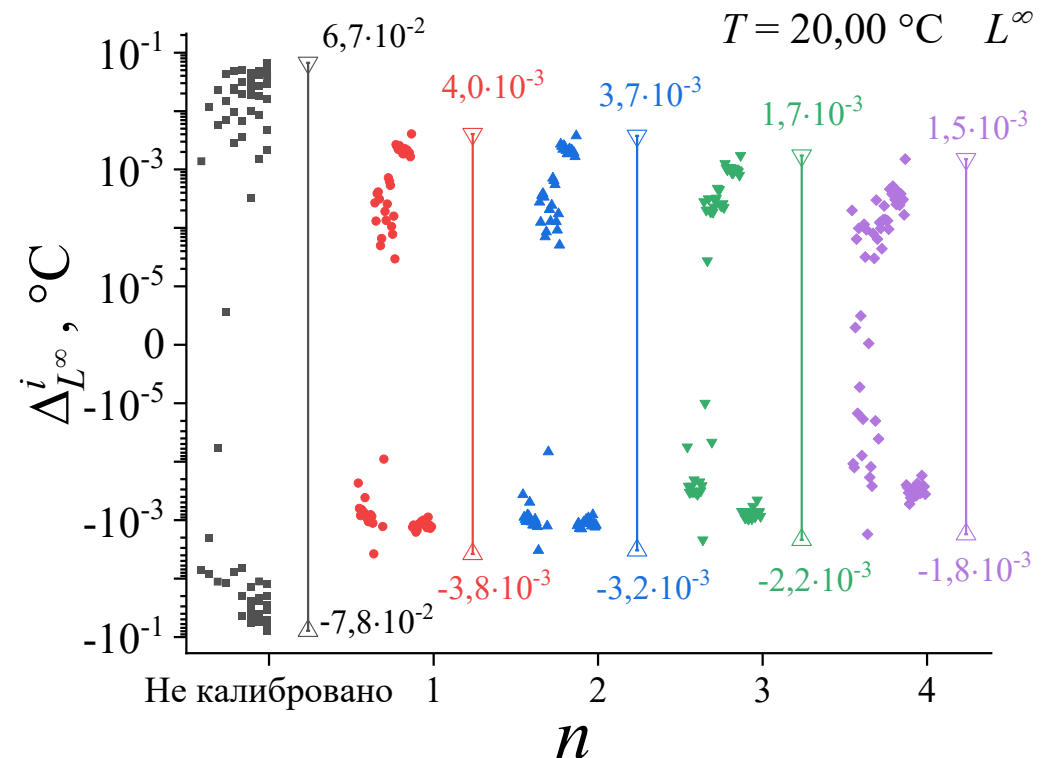
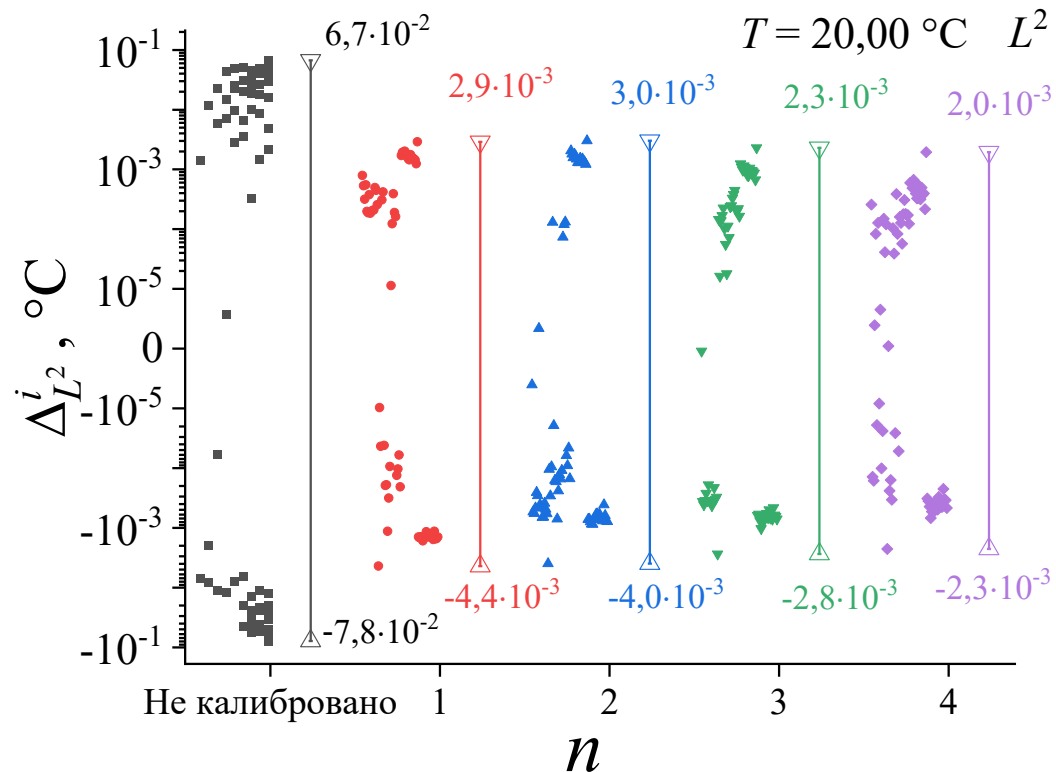
$$L^\infty = \max_j \left| P_i(T_i^j) - T_{etalon}^j \right|$$

Калибровка датчиков Pt100

Сужение размаха выборки показаний датчиков после калибровки – см. след слайд

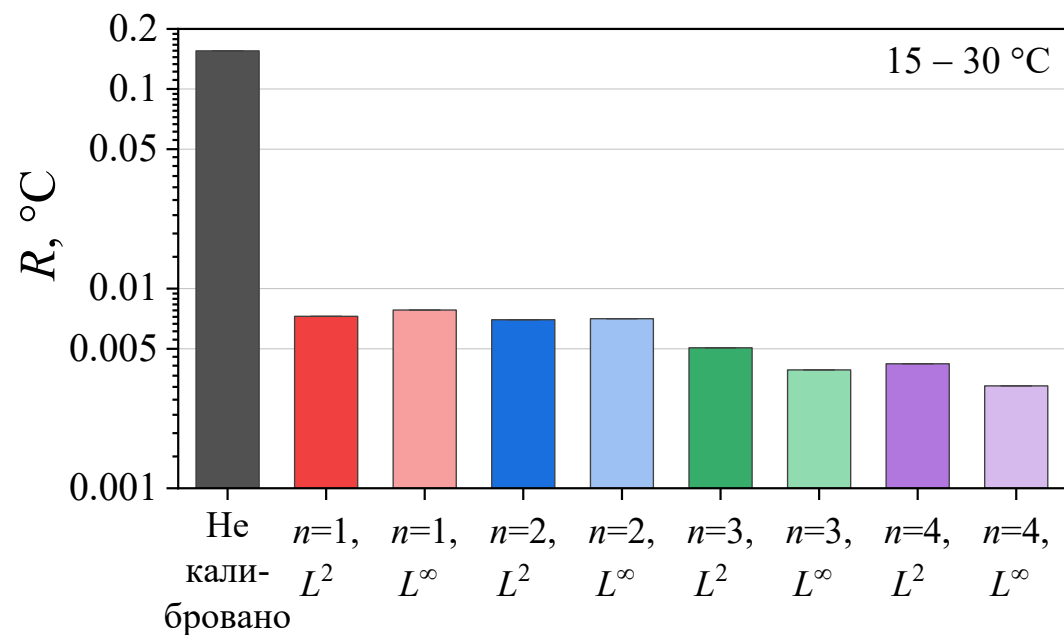
Минимизация среднеквадратичного отклонения:

Минимизация нормы Чебышева:



Калибровка датчиков Pt100

Сужение размаха выборки показаний датчиков после калибровки:



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

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^∞ . Пример: сужается размах выборки для $n = 4$ на 25 %, по сравнению с критерием минимизации L^2 до 0,0033 °C.

Использование индивидуальных калибровочных коэффициентов позволяет получить значения температуры с отклонением до 0,01 °C от эталонного датчика калибратора

Вклад постдока: написание кодов для обработки временных рядов и поиска калибровочных коэффициентов, анализ выборок показаний датчиков, подготовка черновика статьи

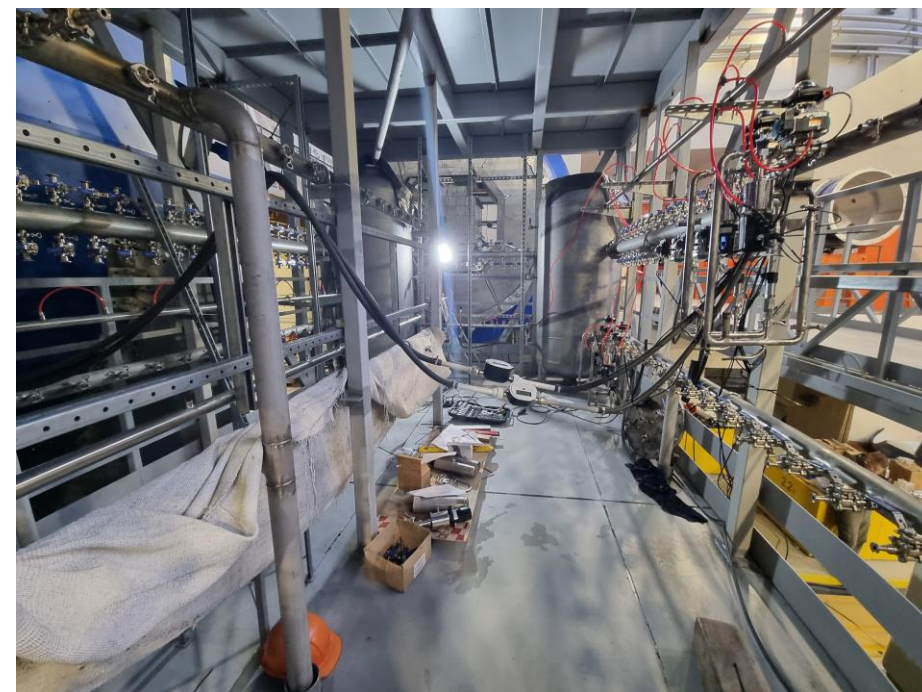
Пробный пуск системы термостабилизации и охлаждения

03.12.2024 – 11.12.2024 на Южной платформе MPD состоялся **пробный пуск** Системы охлаждения и термостабилизации;

Проверены:

- **Отсутствие течи** при высоких давлениях;
- Работа в **номинальных** режимах;
- Пределы возможностей насосов в режимах **с повышенной нагрузкой**.

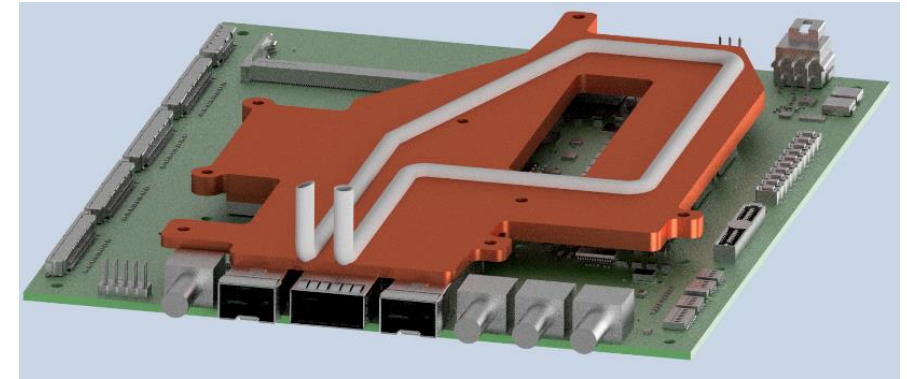
Вклад постдока: программа экспериментального тестирования, анализ и интерпретация экспериментальных данных, составление протокола пробного пуска



Расчет радиаторов охлаждения контроллера для карт FEC

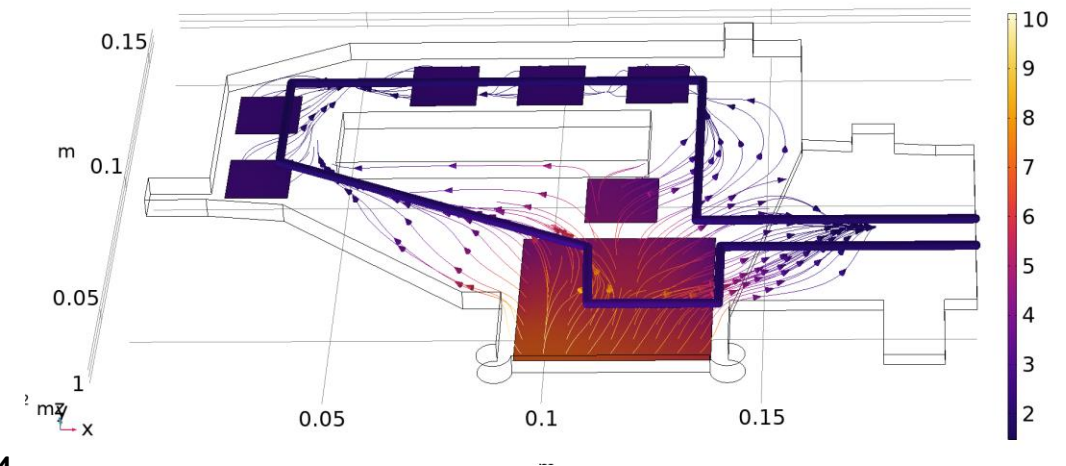
- Разработана модель теплопередачи для контроллеров FEC с радиаторами и водяным охлаждением;
- Оптимизирован дизайн водяной магистрали с увеличением диаметра трубок до 6 мм при реальных характеристиках тепловых контактов (термопаста, коэффициент теплопроводности $3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, толщина $0,5 \text{ мм}$);
- Расчет подтвердил эффективность водяного охлаждения при нагрузке 55 Вт/контроллер с перегревом менее 16°C относительно воды и сохранение *leakless*.

Вклад постдока: построение компьютерной модели, оптимизация геометрии и параметров водяной магистрали, анализ и подготовка рекомендаций



Исходная модель радиатора контроллера

Линии тока теплового потока, цвет - превышение температуры над температурой входящей воды



Оптимизированная линия охлаждения (цветовая шкала – избыточная температура, линии тока – тепловой поток)

Разработка элементов термостабилизации газовой смеси ТРС

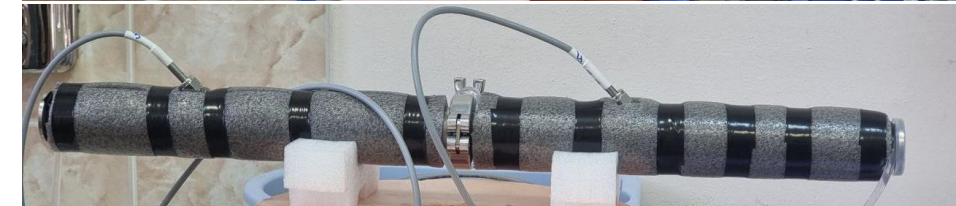
- Термостабилизация газовой смеси в ТРС обеспечивается как стабильной температурой границ газового объема, так и подготовкой газа;
- Рассчитан, спроектирован и изготовлен прототип теплообменника для подготовки рабочей газовой смеси и охранного газа с точностью 0,1 °C;
- Собран прототип газовой трассы с водяной рубашкой и датчиками температуры проточного газа, обеспечивающая стабильность температуры 0,03 °C/м.



Изготовленный теплообменник



Теплообменник



Тестовая газовая трасса с водяной рубашкой и датчиками температуры

Вклад постдока: моделирование и расчет эффективности теплообменника, программирование датчиков температуры Keithley+LabVIEW, программа экспериментов по термостабилизации газа в водяной рубашке

Публикации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Зур И., Федотов А., Шафаревич Ю., Медведева М., Шиш А., Федотова Ю., Балашов И., Макаров А., Мещеряков Г., Базылев С., Терлецкий А., Дубровин А. Гидродинамический расчет и стендовые испытания системы охлаждения электроники ADC64ECal в режиме leakless // **Письма в ЭЧАЯ**. 2025. Т. 22, № 1(258). С. 29–41.
2. Zur I.A., Fedotova J.A., Fedotov A.S., Shmanay Y.Y., Fedotov A.K., Kharchanka A.A., Gorbachuk N.I., Ermakova E.A., Movchan S.A. Influence of humidity on the electrophysical properties and charge transfer mechanism in nanoscale diamond-like carbon coatings // **Carbon**. 2025. Vol. 237. P. 120100.
3. Zur I.A., Shmanay Y.Y., Kharchnka A.A., Fedotov A.K., Fedotov A.S., Kazimirov N.A., Fedotova J.A., Movchan S.A. Improving the energy resolution of a ThGEM detector by incorporating an additional electrode composed of a metallised track-etched membrane // **Radiation Physics and Chemistry**. – Принята к публикации, в печати. – Manuscript RPC-D-24-01903R1.

Работа «Термостабилизация рабочей газовой смеси для детектора TPC/MPD» - лауреат премии конкурса работ ЛФВЭ за 2024 г.

Доклады на конференциях:

1. Fedotov A. S., Zur I. V., Kunts A. V., Galkin Y. A., Medvedeva M. A., Shafarevich Y. V., Fedyunin A. I., Makarov A. I., Mescheryakov G. V., Movchan S. G. TPC and ECAL cooling system: status / Fedotov A. S., Zur I. V., Kunts A. V., Galkin Y. A., Medvedeva M. A., Shafarevich Y. V., Fedyunin A. I., Makarov A. I., Mescheryakov G. V., Movchan S. G.. – XIII Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility, 23-25 April 2024. – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28725/> (accessed: 29 November 2024).
2. Fedotov A., Mescheryakov G., Fateev O., Ryubakov A., Makarov A., Balashov I., Butorin A., Pukhaeva N., Zur I. TPC and ECAL cooling system: status / A. Fedotov, G. Mescheryakov, O. Fateev, A. Ryubakov, A. Makarov, I. Balashov, A. Butorin, N. Pukhaeva, I. Zur. – XIV Collaboration Meeting of the MPD Experiment at NICA, 14-16 October 2024. – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28725/> (accessed: 29 November 2024).
3. Федотов А. Влияние тепловых флуктуаций на точность определения координат событий в камере с временным проекционным методом (TPC) / А. Федотов, И. Зур, Ю. Шафаревич, Я. Галкина, А. Кунц, С. Мовчан. – 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября – 1 ноября 2024 г. – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28725/>
4. Miadzvedzeva M., Fedotov A., Zur I., Balashov I., Movchan S. Computer modeling of the thermal stabilization system for the MPD detector of NICA / M. Miadzvedzeva, A. Fedotov, I. Zur, I. Balashov, S. Movchan. – 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 28 October 2024. – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28725/> (accessed: 29 November 2024).
5. Федотов А., Медведева М., Зур И., Кунц А., Галкин Я., Чеховский В., Федотова Ю., Шиш А., Шафаревич Ю., Мовчан С., Мещеряков Г., Макаров А., Балашов И., Сенкевич В., Галуза А. Термостабилизация электроники ROC установки MPD коллайдера NICA // Материалы IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (СПТЭ-2024), Москва, 21–25 октября 2024 г. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – С. 139–141. – 460 с.

Текущие задачи и ближайшие планы

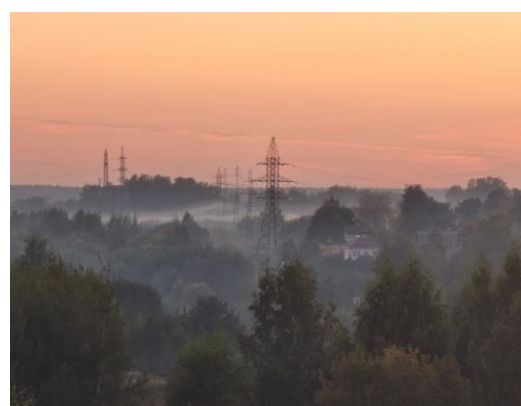
- Расчет распределения температуры в газовом объеме ТРС с учетом теплового потока со стороны TOF компьютерным кодом nek5000 на «Говорун» ;
- Создание модели системы лазерной калибровки ТРС для определения параметров управляющей механики для зеркал;
- Калибровка каналов Siemens PLC-1500 и датчиков температуры на базе Pt100 для системы прецизионной термометрии.

Завершается работа над статьями:

1. «Система измерения температуры для системы термостабилизации детектора ТРС установки MPD»;
2. «Radiation stability and hydraulic performance of flexible pipes for TPC cooling system of MPD/NICA».

Осуществляется научное руководство дипломными работами студентов :

- Шафаревич Ю.В. «Ионизация рабочего газового объема детектора ТРС наносекундными лазерными импульсами»
- Медведевой М.А. «Высокопроизводительные вычисления температурного поля во время-проекционной камере (ТРС) детектора MPD».



Спасибо за внимание!

