



Система охлаждения детектора MPD

Внутренний доклад ЛФВЭ

Докладчик Федотов А.С.

План доклада

План доклада:

1. Цель и задачи системы охлаждения;
2. Подготовительный этап;
3. Leakless режим течения;
4. Экспериментальное тестирование;
5. Инженерная реализация.

Цель и задачи

Цель: обеспечить охлаждение электроники (ESaI, TPC) и термостабилизацию рабочего газового объема (TPC)

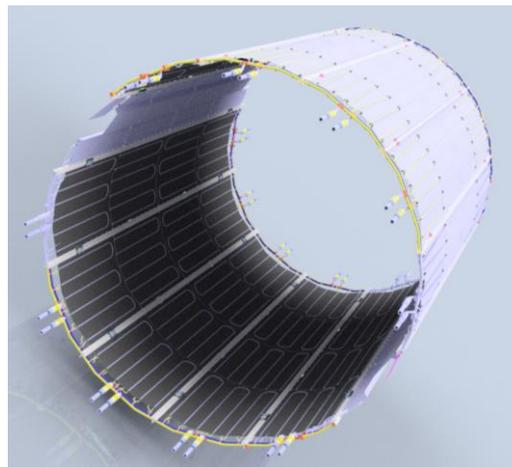
Задачи:

- Обеспечить *leakless* режим течения хладносителя;
- Обеспечить **термостабилизацию** – высокую однородность температурного поля в рабочем газовом объеме TPC;
- Обеспечить **охлаждение** – эффективный отвод тепла охлаждаемой электроники;

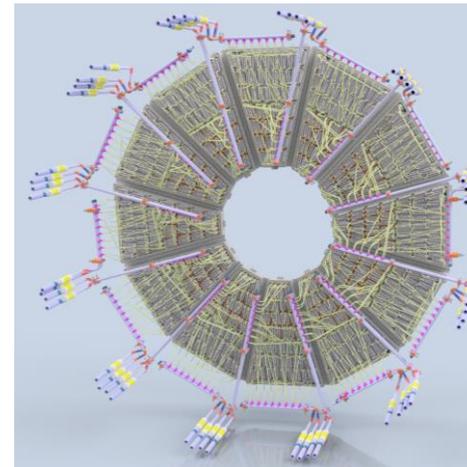
Система охлаждения и термостабилизации



Вид на MPD



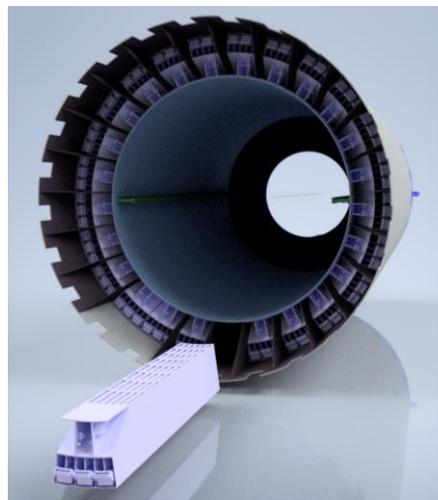
Внешний тепловой экран



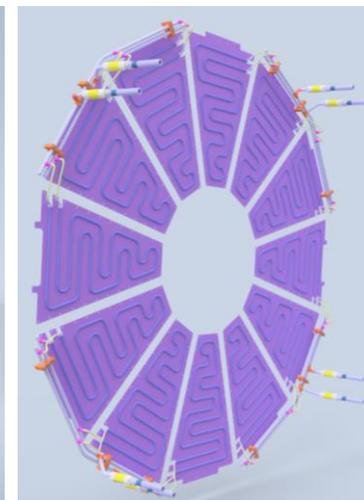
Карты SAMPA и FEC + корпуса камер ROC



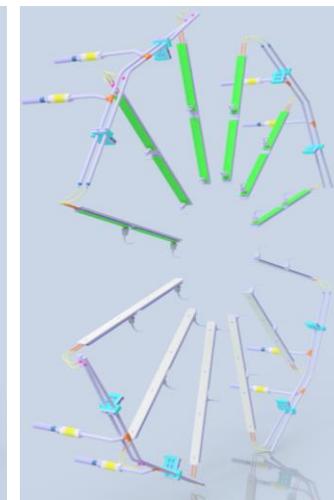
Фланцы



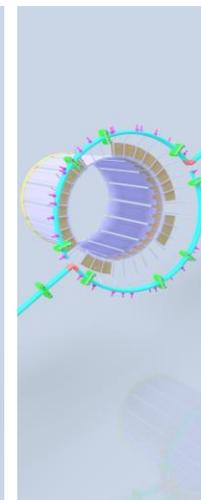
ECAL



Фронтальный термоэкран



LVDB



Внутренний тепловой экран

Подготовительный этап

Предварительные данные

Оценка мощности и необходимого потока

$$\dot{m} \times c_p \times \Delta T = U \times A \times \Delta T_{\text{ср}}$$

где:

\dot{m} - массовый расход жидкости (кг/с),

c_p - удельная теплоёмкость жидкости (Дж/(кг °C)),

ΔT - изменение температуры жидкости (°C),

U - общий коэффициент теплопередачи (Вт/(м² · °C)),

A - поверхность теплообмена (м²),

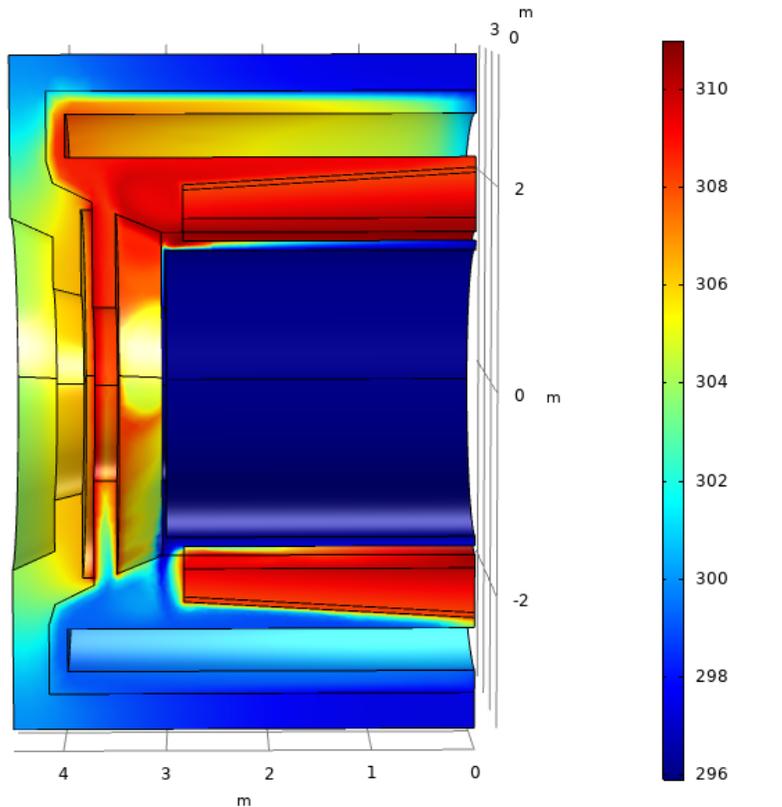
$\Delta T_{\text{ср}}$ - средняя разность температур между жидкостью и стенкой трубы (°C).

Фрагмент технического задания по MPD:

	Подсистема TPC	Нагрузка, (кВт)	Число регулируемых контуров N	Расход воды на 1 контур (м ³ /час)	Общий расход воды на подсистему (м ³ /час)
1	Внутренний цилиндрический термо- экран, (термостабилизация, TPC-Al)	< 0.05 (от FFD)	2x2=4	0.5	2
2	Внешний цилиндрический термо- экран, (термостабилизация, TPC-Al)	0.4 +/- 0.1 (от ECAL + TOF)	6x2=12	0.192 x 9 = 1.728 (9 подконтуров)	20.7
3	Торцевые термозкраны (термостабилизация, TPC-Al)	0.5 +/- 0.1 (от ECAL + TOF)	2x2=4	0.5	2
4	Фланцы со спицами (термостабилизация, TPC-Cu)	0.15 +/- 0.02 (от проводов питания и карт FEE)	8x2=16	0.25	4
5	24 корпуса ROC камер (термостабилизация, TPC-Cu)	10Втx24=0.24	12x2=24	0.1	2.376
6	Электроника FEE SAMPA (термостабилизация, TPC-Cu)	126Втx24=3.03	12x2=24	0.21 (распараллелено на 11 подконтуров)	5.2
7	Электроника FEE FPGA (охлаждение, TPC-Cu)	158Втx24=3.80	4x2=8	0.65 (распараллелено на 6 подконтуров)	5.2
8	Стабилизаторы LVDB и контроллеры считывания (охлаждение, TPC-Cu)	8.45	2x2=4	0.114x6=0.684	2.736
	Итого:	16.6	96	-	44.212

Предварительные данные

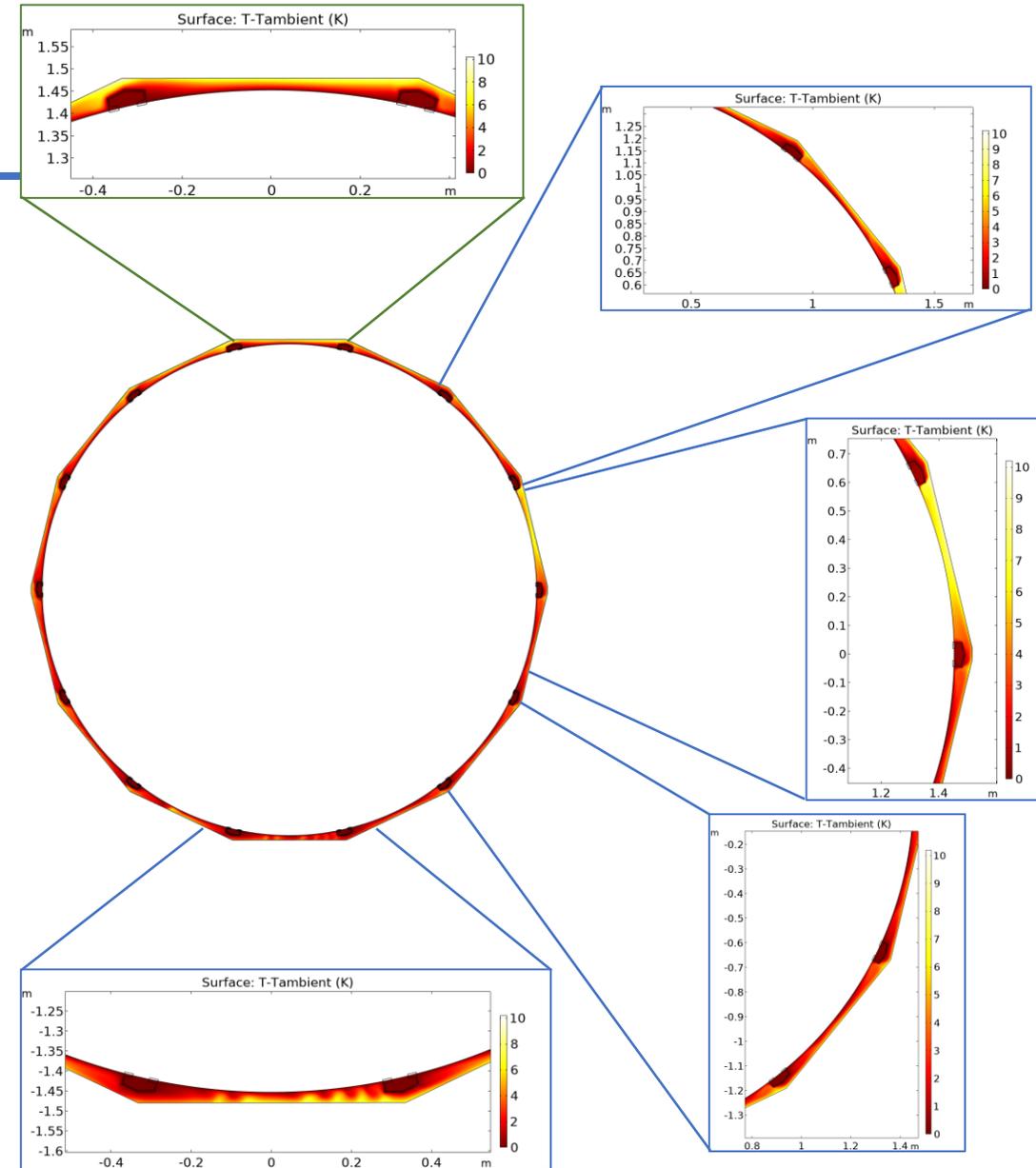
«Расчет тепловых режимов установки MPD и системы термостабилизации ТРС», 2020 г



Распределение температуры воздушных прослоек MPD

«Оценка тепловой нагрузки на рабочую газовую смесь детектора ТРС от соседних суб-детекторов установки MPD и от электроники считывания ТРС», 2021 г

Превышение температуры над температурой термостабилизации в различных участках воздушного зазора между термоэкраном ТРС и TOF



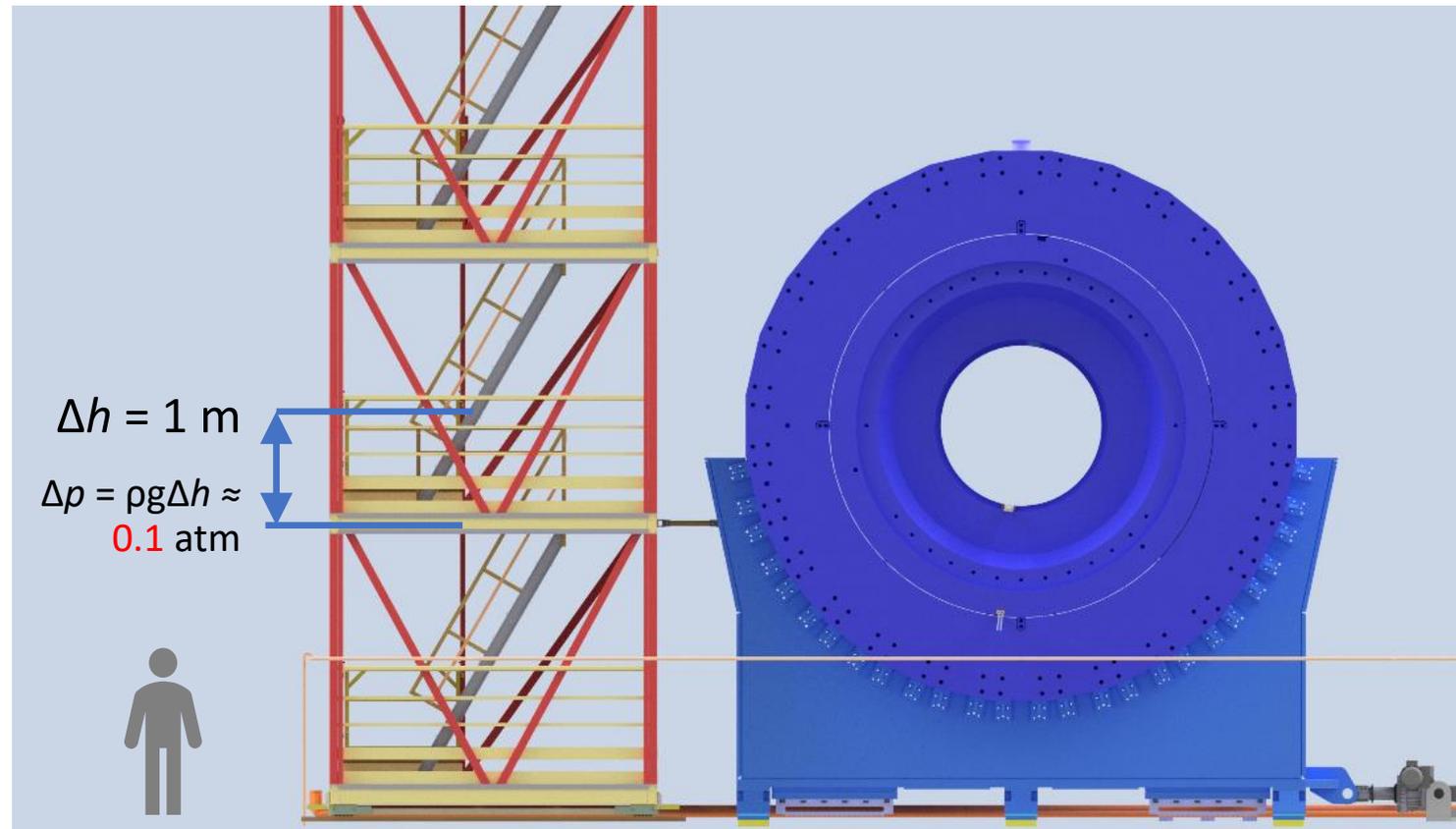
Расчет течения leakless

Система охлаждения и термостабилизации

Режим *leakless* требует абсолютного давления в TPC & ECAL < 1 атм.

- Каждый метр водяного столба изменяет давление на 0.1 атм;
- Высота MPD ≈ 8 m;
- Давление **выше** 1 атм может привести к **протеканию**;
- Давление **ниже** 0.1 атм может стать причиной кавитации или остановки.

Чтобы рассчитать режим работы нужно знать гидравлические сопротивления контуров



Физическая модель

Уравнения Навье-Стокса для труб:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \frac{1}{2} f \frac{|u| \vec{u}}{D} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\ \rho c_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T_l \right) = \nabla \cdot (\lambda_l \cdot \nabla T_l) + \frac{1}{2} f \frac{\rho |u| \vec{u}}{D} + Q_{\text{wall}} \\ \rho c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \cdot \nabla T_s) + Q_{\text{heat}} \end{array} \right.$$

\vec{u} – скорость,

P – давление воды,

T_l – температура воды,

T_s – температура твердого тела,

λ – коэффициент теплопроводности,

c – теплоемкость

Q – источник тепла,

g – ускорение

свободного падения,

ρ – плотность,

D – диаметр трубы,

f – фактор Дарси.

Уравнение Колбрука-Уайта для фактора Дарси:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

Re – число Рейнольдса;

ε – шероховатость стенок трубопровода.

Падение давления на изгибах:

$$\Delta p = \frac{1}{2} K_f \rho u^2$$

K_f – коэффициент потерь.



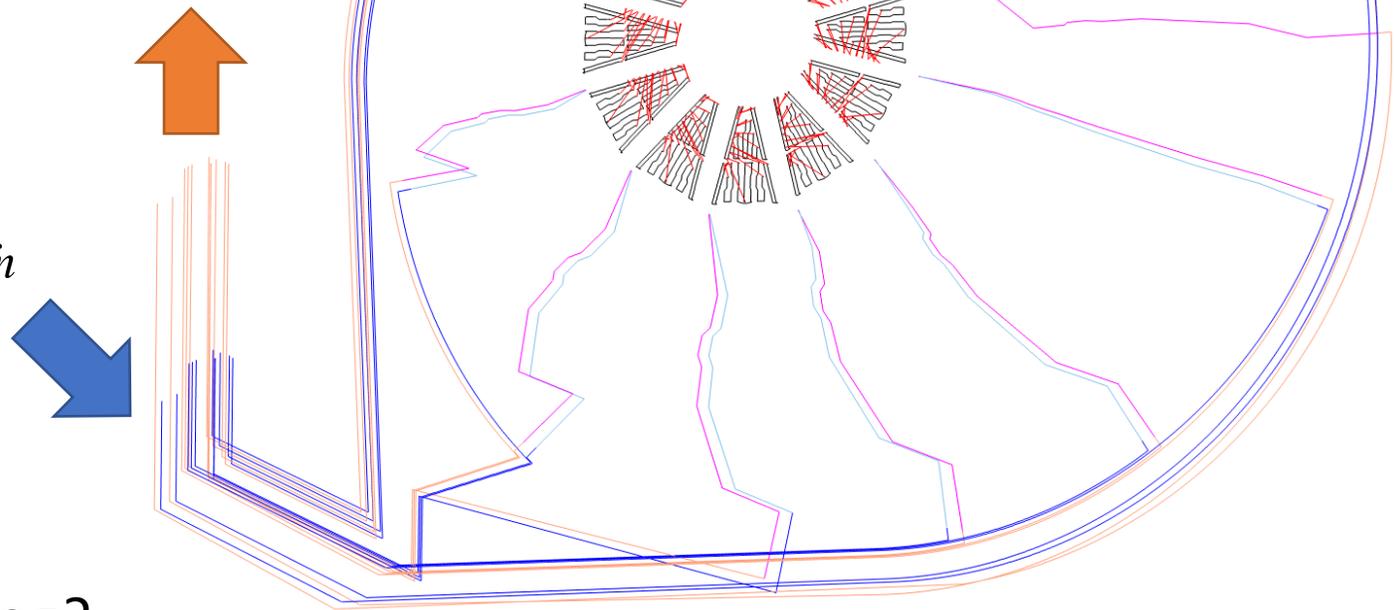
Постановка задачи

Краевая задача на примере SAMPA

$$\text{Вход: } \begin{cases} (-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T))\vec{n} = -p_{\text{tank}}\vec{n} \\ p_{\text{tank}} = 0.35 \text{ atm} \end{cases}$$

$$\text{Выход: } -\rho \frac{\pi D^2}{4} \vec{u} \cdot \vec{n} = \dot{m}$$

Массовый расход \dot{m} определялся из ТЗ заранее



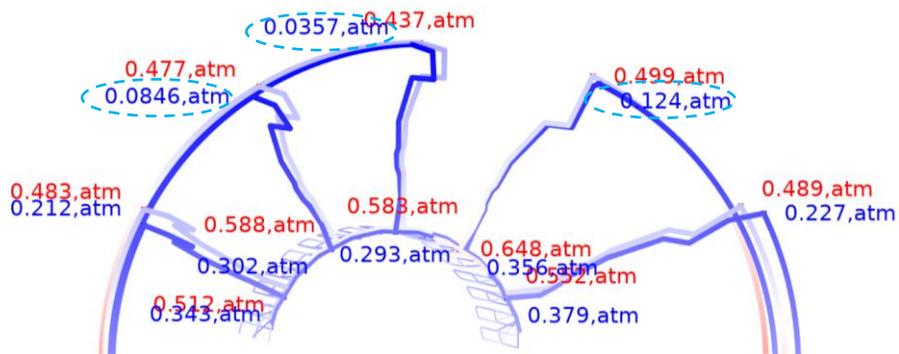
Пример краевой задачи для SAMPA

Находим ответ на **два вопроса**:

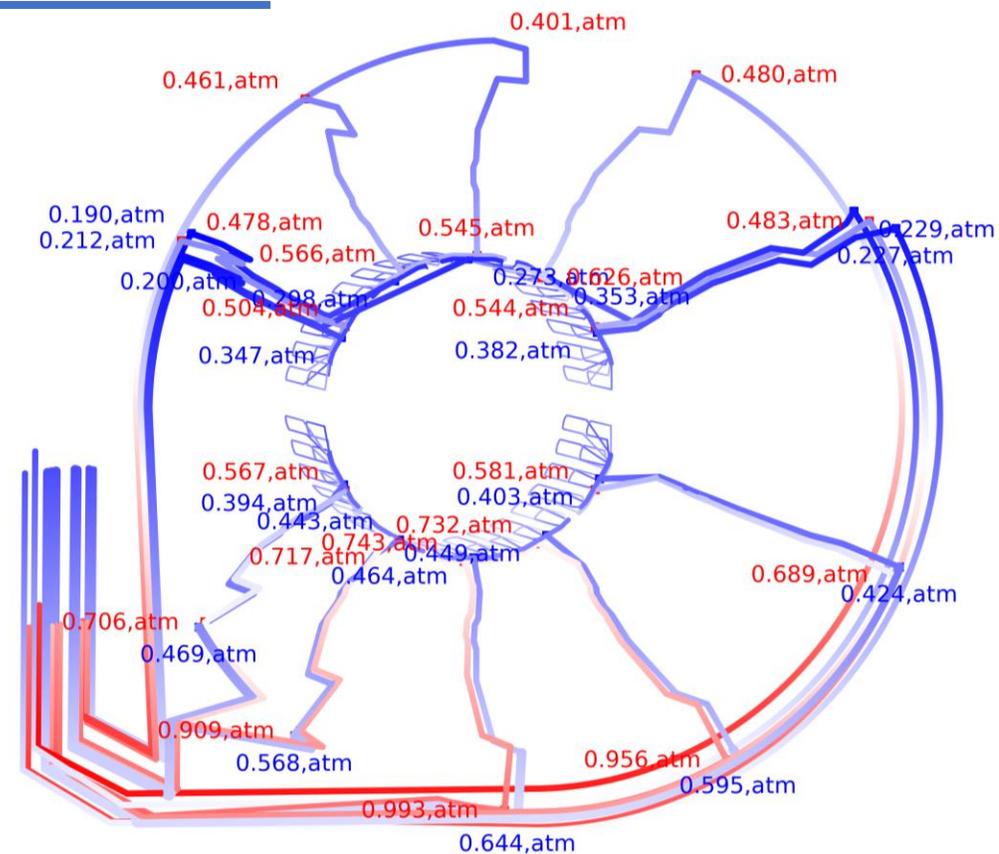
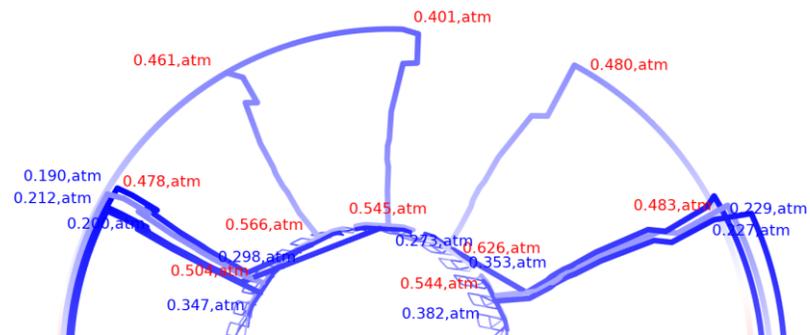
- Какое давление нужно подать на вход?
- Будет ли соблюдаться $0.1 \text{ atm} < p < 1$?

Внешний тепловой экран

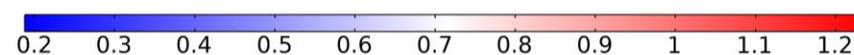
Изначальный концепт: “одно окно MPD для входа и выхода трубы” – слишком **низкое давление** на выходе



Новый концепт: “выходные трубы в верхней половине MPD направляются в боковое окно” – давление ОК



▼ 0.188



▲ 1.24 atm

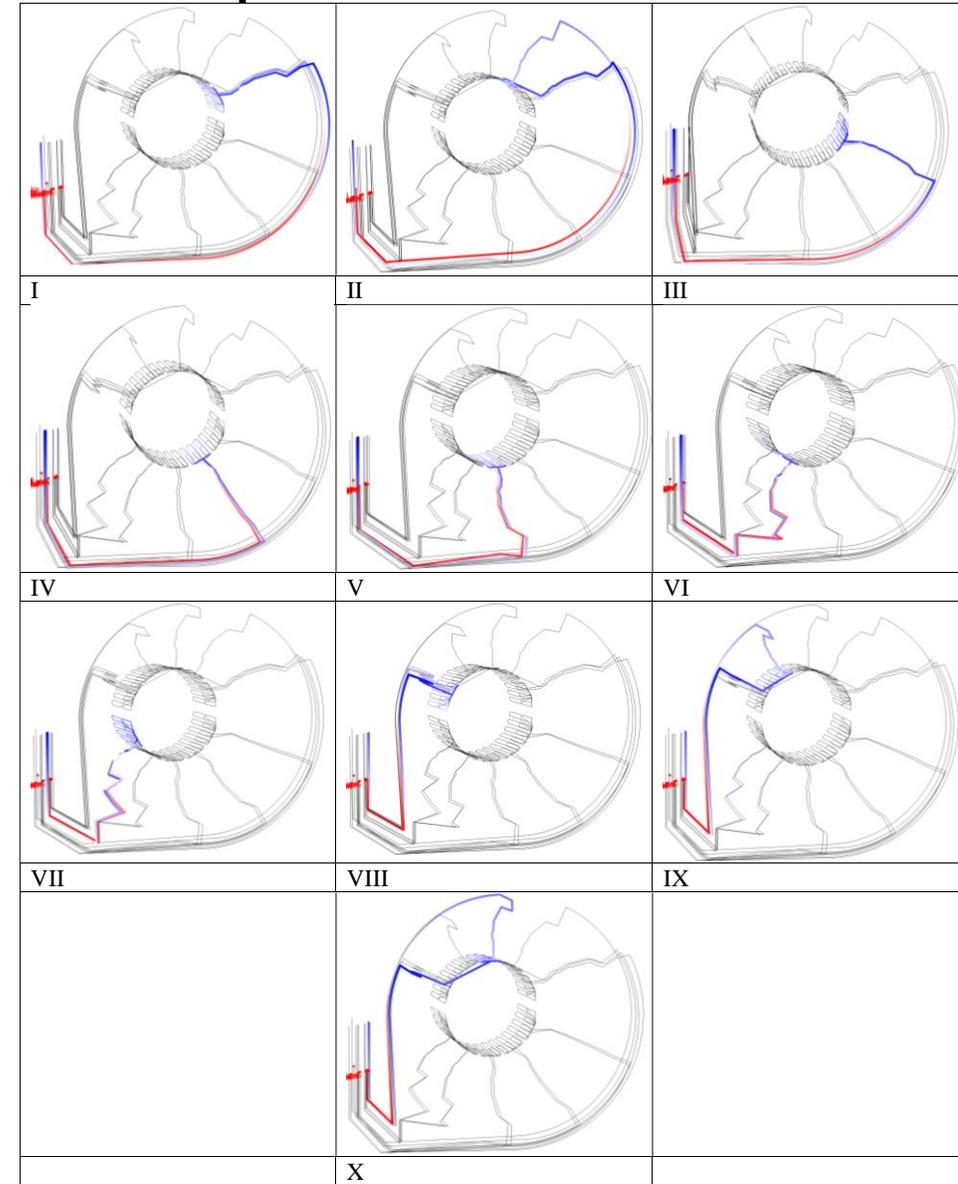
Распределение абсолютного давления в новом концепте

Параметры внешнего теплового экрана

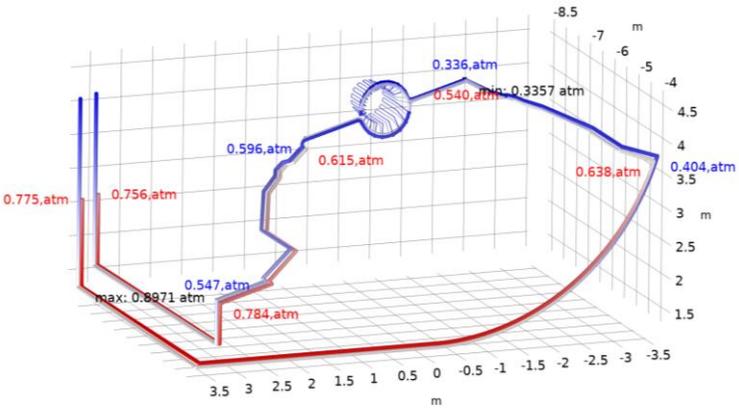
Входные данные

Параметр	Значение
Диаметр подводов MPD d_{MPD_in}	20 мм
Диаметр отводов MPD d_{MPD_out} для контуров III, IV, V, VI, VII	30 мм
Диаметр отводов MPD d_{MPD_out} для контуров I, II, VIII, IX, X	20 мм
Диаметр подводов TPC d_{TPC_in}	20 мм
Диаметр отводов TPC d_{TPC_out}	20 мм
Расход на подконтур $q_{out_th_scr}$	1.08 м ³ /ч
Высота верхнего коллектора h_{c-u}	4.1 м
Высота нижнего коллектора h_{c-d}	2.6 м
Шероховатость трубок ϵ	0.015 мм
Давление в баке p_{tank}	0.35 атм
Давление на вход в контур I p_{itsI}	0.996 атм
Давление на вход в контур II p_{itsII}	1.11 атм
Давление на вход в контур III p_{itsI}	0.85 атм
Давление на вход в контур IV p_{itsII}	0.94 атм
Давление на вход в контур V p_{itsI}	0.92 атм
Давление на вход в контур VI p_{itsII}	0.90 атм
Давление на вход в контур VII p_{itsI}	0.80 атм
Давление на вход в контур VIII p_{itsI}	0.92 атм
Давление на вход в контур IX p_{itsI}	1.04 атм
Давление на вход в контур X p_{itsI}	1.04 атм
Число Рейнольдса в нагрузке Re	$(0.5 - 1.2) \cdot 10^4$

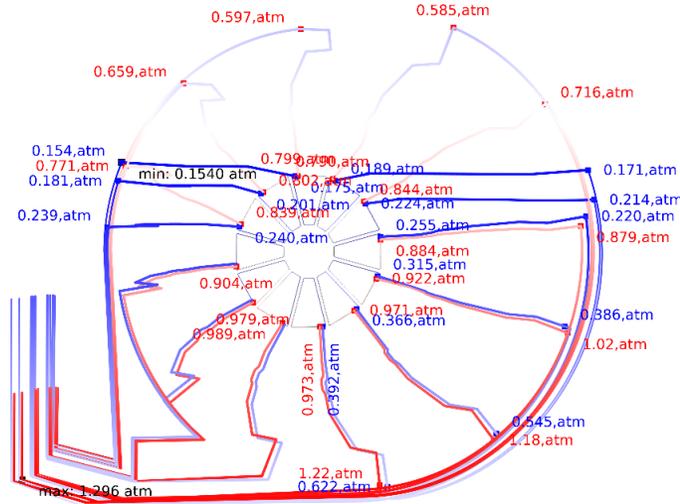
Вычисляемые результаты



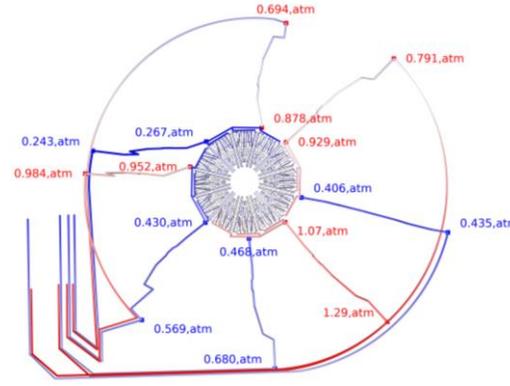
Расчет параметров для всех контуров



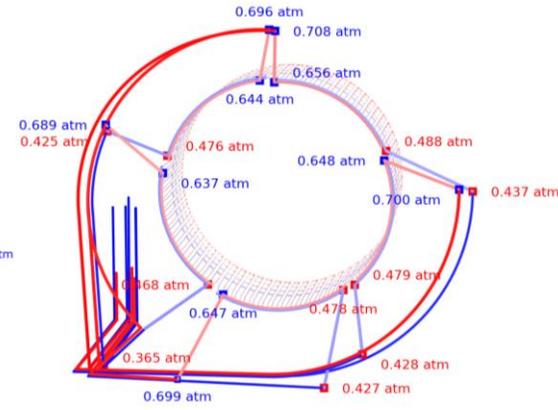
Внутренний тепловой экран



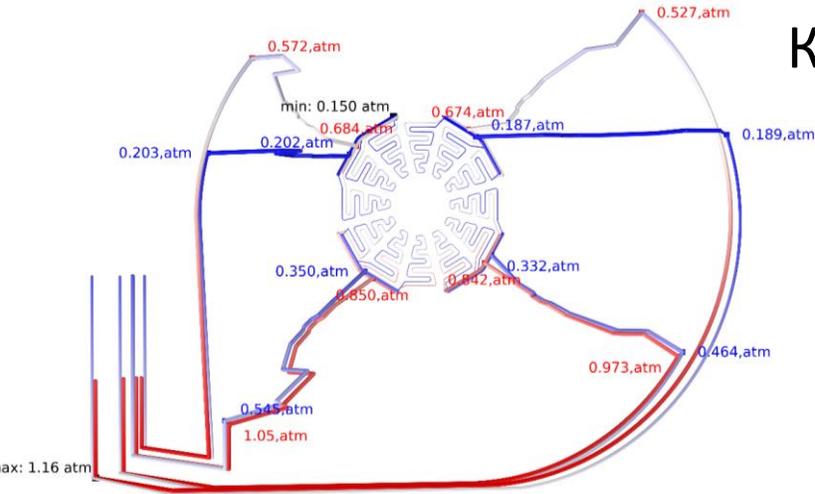
Корпуса камер ROC



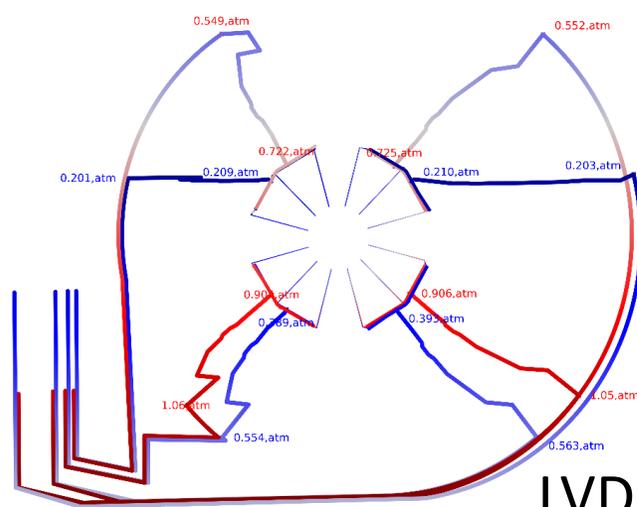
FPGA



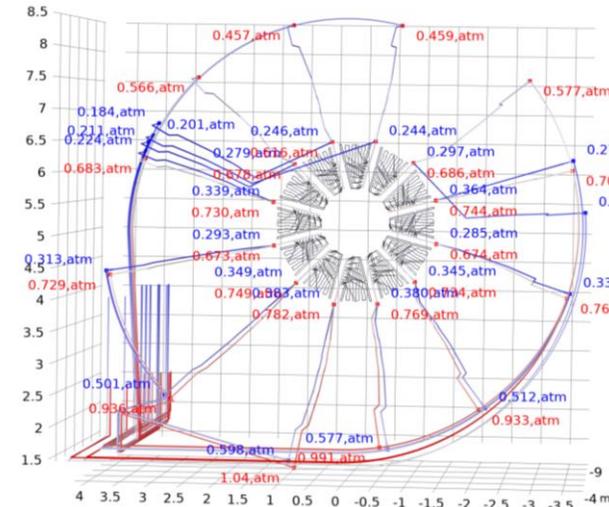
ECAL



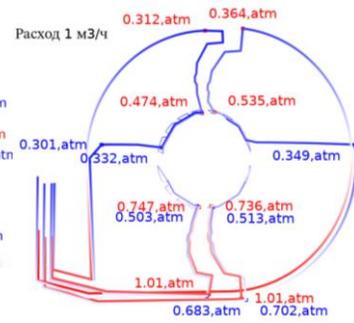
Фронтальный тепловой экран



LVDB



SAMPA



Фланцы

Обновленные параметры системы

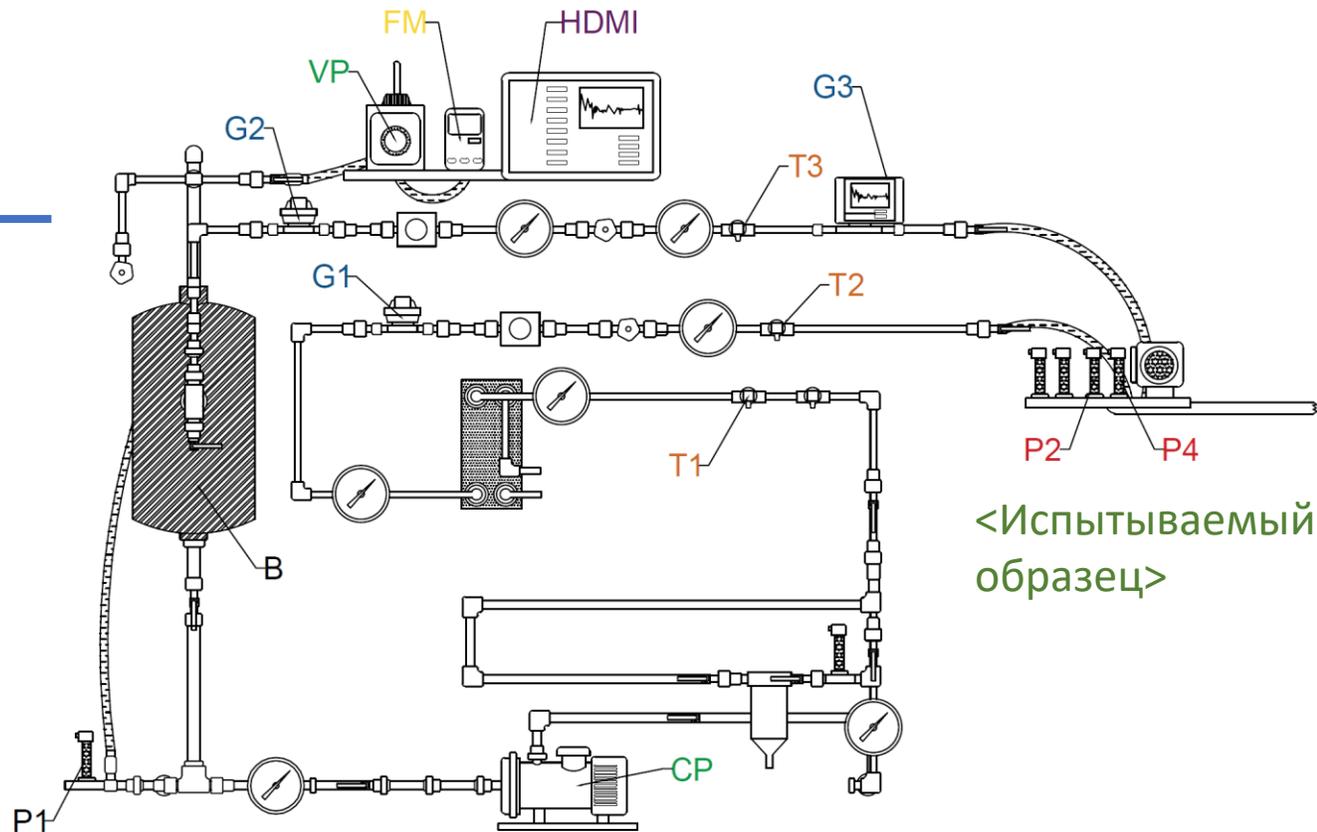
Название системы	Расход на контур	Количество подконтуров	Расход на подконтур	Мощность, кВт
Внешний тепловой экран	20,7 м³/ч	8	1.21 м³/ч	0,5
		12	0.91 м³/ч	
Фронтальный тепловой экран	1,44 м³/ч	8	0,18 м³/ч	0,6
Фланцы	8,0 м³/ч	8	1 м³/ч	0,15
Корпуса ROC	2,4 м³/ч	24	0,1 м³/ч	0,02
LVDB	2,74 м³/ч	8	0,34 м³/ч	8,45
FEC-FPGA	6,62 м³/ч	6	0,84 м³/ч	3,8
		2	0,79 м³/ч	
FEC-SAMPA	13,2 м³/ч	12	0,55 м³/ч	3,03
Внутренний термоэкран	2 м³/ч	4	0,5 м³/ч	0,05
		10	0,324 м³/ч	7,5
Термостабилизация газа	0.3 м³/ч	3	0,1 м³/ч	минимальна
Суммарно на систему	60,34	105		24,1

Радиаторы и экраны были изготовлены на подготовительном этапе.

Их изготовление можно объединить с расчетами течения.

Экспериментальное тестирование

Испытательный стенд



Насосы:

CP – циркуляционный насос Wilo 903; **VP** – вакуумный насос VALUE 115N;

Электроника:

FM – частотный преобразователь;

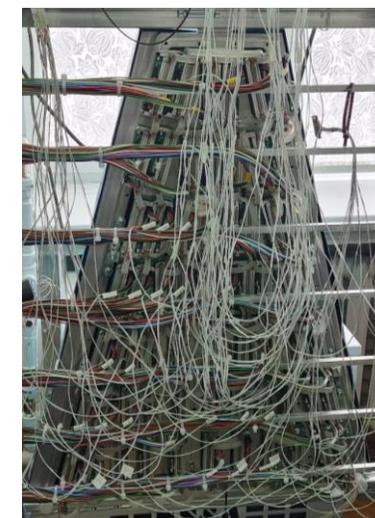
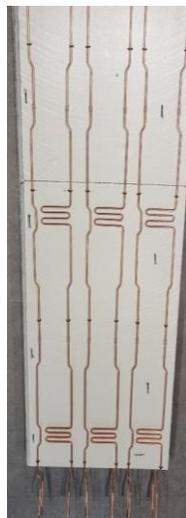
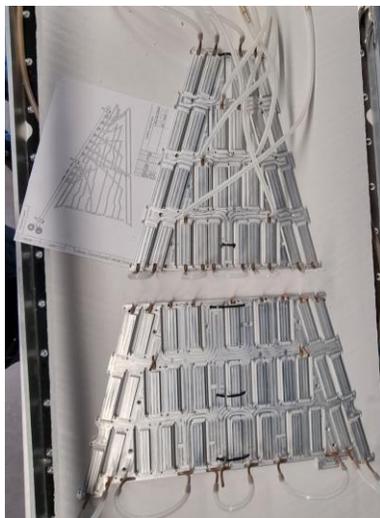
HDMI – панель управления WEINTEK сMT3162X;

Сенсоры:

G1, G2 – вихревые расходомеры SV3150, **G3** – Текноу Флексус;

T1-T3 – погружные датчики температуры; **P1-P4** – датчики давления.

Гидродинамический эксперимент



Элемент

SAMPA

ECAL

Frontal thermal
screen

Outer thermal
screen

LVDB

ROC case

FPGA

q , m³/h

0,55

0,12

0,08

0,91

0,1

0,1

0,27

ΔP_{exp} , atm

0,47

0,16

0,15

0,41

0,5

0,5

0,52

ΔP_{sim} , atm

0,50

0,18

0,15

0,38

0,5

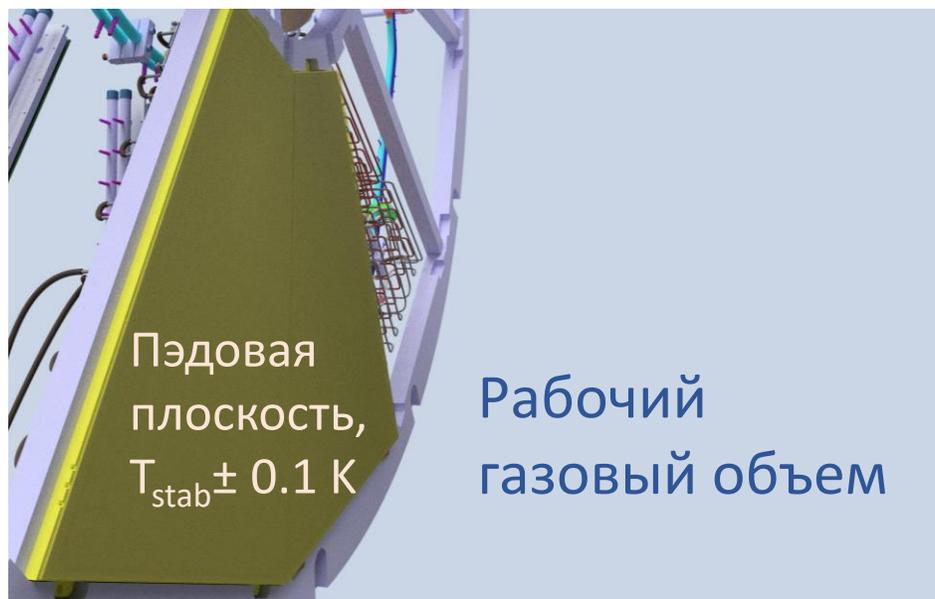
0,5

0,55

Frontal thermal screen behaves **better than predicted**, the rest are **similar**

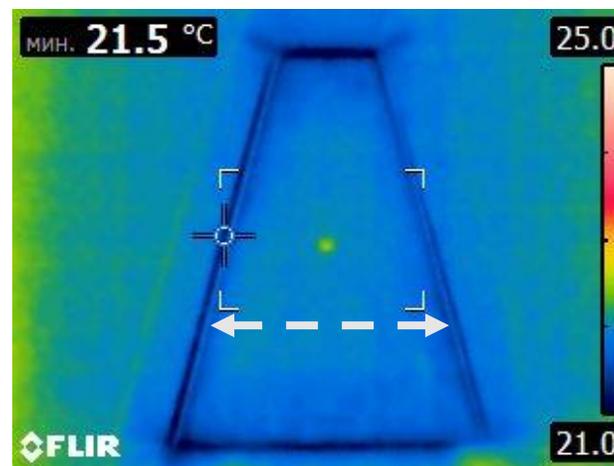
Тепловой эксперимент

Достижима ли **термостабилизация 0.1 К** в принципе?

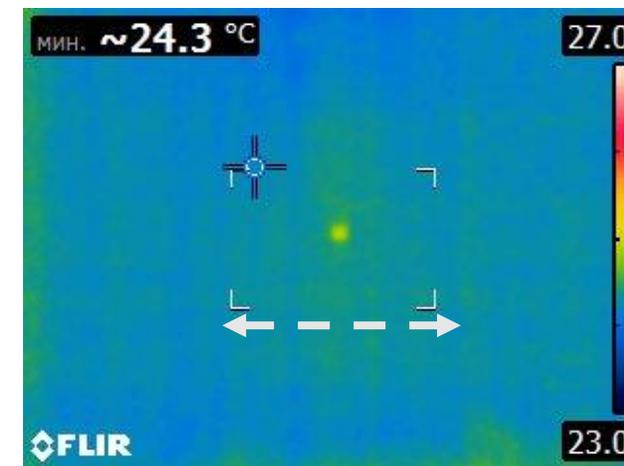


Пэддовая плоскость в контакте с рабочим газовым объемом

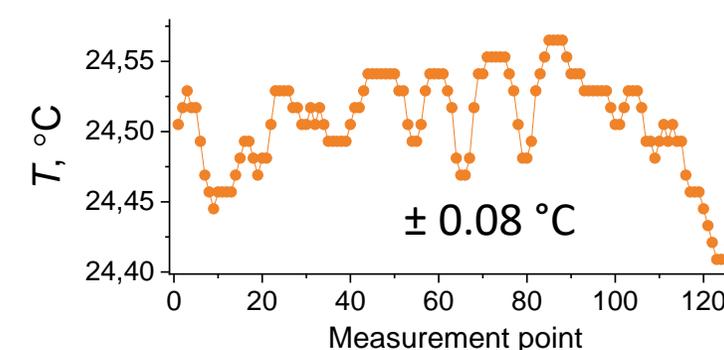
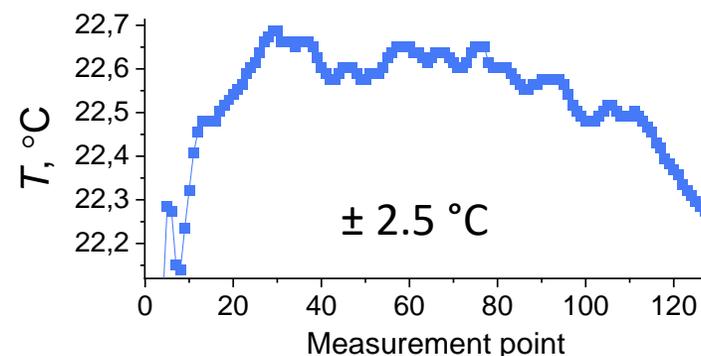
https://rutube.ru/video/private/fc768c02ae8ce14493c1f14abc95949b/?p=MdkkueBE9O_rzah2Bd1gRA



Pad plane without ROC input water heating

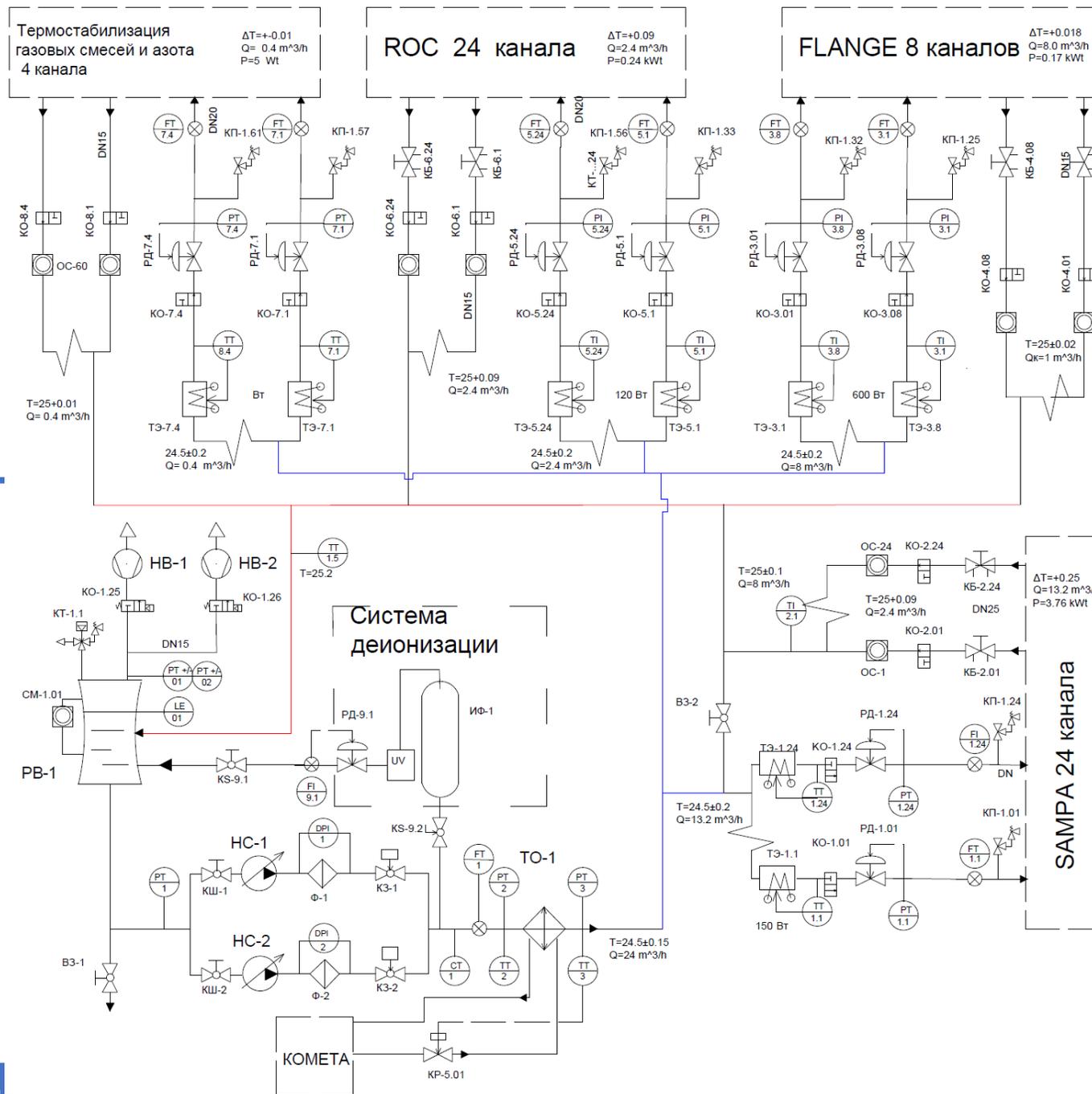


Pad plane with ROC input water heating $T = 23 \text{ °C}$



Инженерная реализация

Схема медного контура термостабилизации

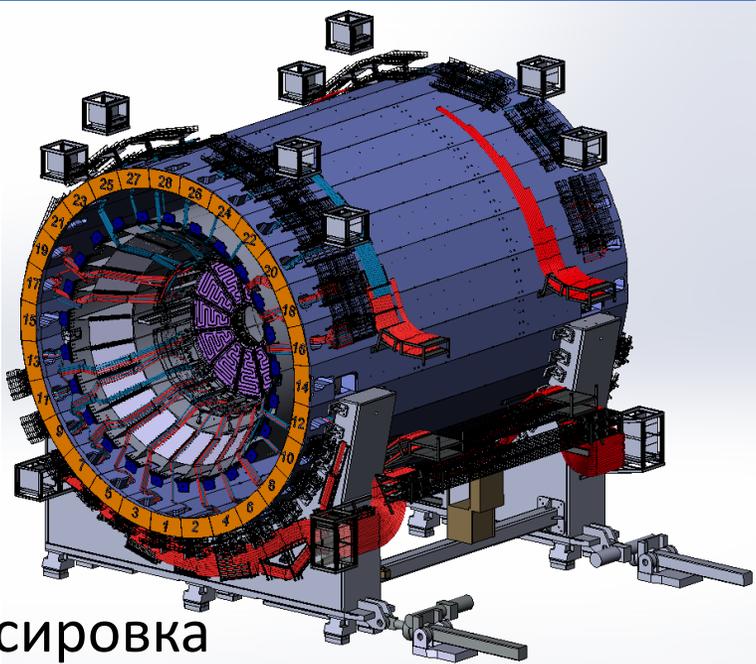


Обозн.	НАИМЕНОВАНИЕ	кол.	Примечание
Ф-1...2	Фильтр 10...30 мкм	2	40 м³/ч
НВ-1...2	Вакуумный насос KNF N 026 ANE	2	1.3м³/ч @P=0.1Bar
РВ-1	Резервуар вакуумный	1	V=1500л P=0.1Bar
КР-5.01	Регулятор (Burkert 2301+8692+ST20)	1	Kv13 DN40
НС-1.1	Насос GRUNDFOSS CRN 32-3 (30м³/ч@35м@4kWt)	2	24 м³/ч DN 65
КЗ-1...2	Кран с пневмоприводом Burkert 8805	2	DN 65
ТО-1	Теплообменник (Danfoss/Ридан XB12)	1	3.8 м²/2 & 22 kWt
РД-8.1...4	Регулятор давления (Burkert 2301+8692+8323)	4	Kv 0. DN15
РД-1.1...24	Регулятор давления (Burkert 2301+8694+8323)	24	Kv 0.64 DN15
РД-3.1...08	Регулятор давления (Burkert 2301+8694+8323)	8	Kv 1.6 DN 15
РД-5.1...24	Регулятор давления (Burkert 2301+8694+8323)	28	Kv 0.16 DN15
КБ-2.1...24	Кран балансировочный Vexve 240	28	Kv=? DN 20
КБ-4.1...8	Кран балансировочный	32	Kv=? DN 20
КО-1.1.24	Кран шаровой с пневмоприводом Burkert 8805 тип А	60	DN 20
КО-2.1.24	Кран шаровой с пневмоприводом 8805 тип В (НО)	60	DN 20
КО-4.1.08	Кран шаровой с пневмоприводом	8	DN 20
ТЭ-1.1...24	ТЭН	24	N=150 Wt
ТЭ-3.1.8	ТЭН	8	N=600 Wt
ТЭ-5.1...24	ТЭН	24	N=120 Wt
КШ-1.1...2	Кран шаровой Vexve 232 (BURKERT TKU001)	2	DN65
ВЗ-1...2	Кран шаровой Vexve 232 (Burkert 2657)	2	DN15
КТ-1.1	Кран трехходовой с пневмоприводом Burkert	1	1/2"
КТ-1...56	Кран трехходовой	56	1/2"
КП-1...60	Клапан предохранительный D7C-S LORCH	60	7мм 25бара
ОС-1...60	Смотровое стекло END-Amaturen SG30021	60	DN20
РД-9.1	Регулятор расхода (Burkert 2301+8694+8035)	1	Kv 1.6 DN 15
ИФ-1	Фильтр деионизационный	1	2 м³/ч
UV	Кварцевая лампа	1	
КИП			
Т-...39	Термопара РТ100	39	
Р-01...50	Преобразователь давления	32	
FI-01	Расходомер BURKERT 8035	1	12. м³/ч DN50
FI-03...27	Расходомер ультразвуковой (Burkert)	24	0.25 м³/ч DN15
FI-28...36	Расходомер ультразвуковой (Burkert)	8	0.5 м³/ч DN15
FI-37...61	Расходомер (Burkert)	24	0.1 м³/ч DN15
СТ-1.1	Датчик электропроводности	1	5-7

Изм.	Дата	Лист	№док	Подпись	Дата
Разраб.		Новиков			
Проверил		Галуза			
Т.контр.					
Н.контр.		Сеневич			
Утвердил		Левков			

Термостабилизация ТСР Медная подсистема	Литера	Лист	Листов
Схема комбинированная принципиальная	О		
	ООО		
	ТурбоЭнерджи		

Оборудование



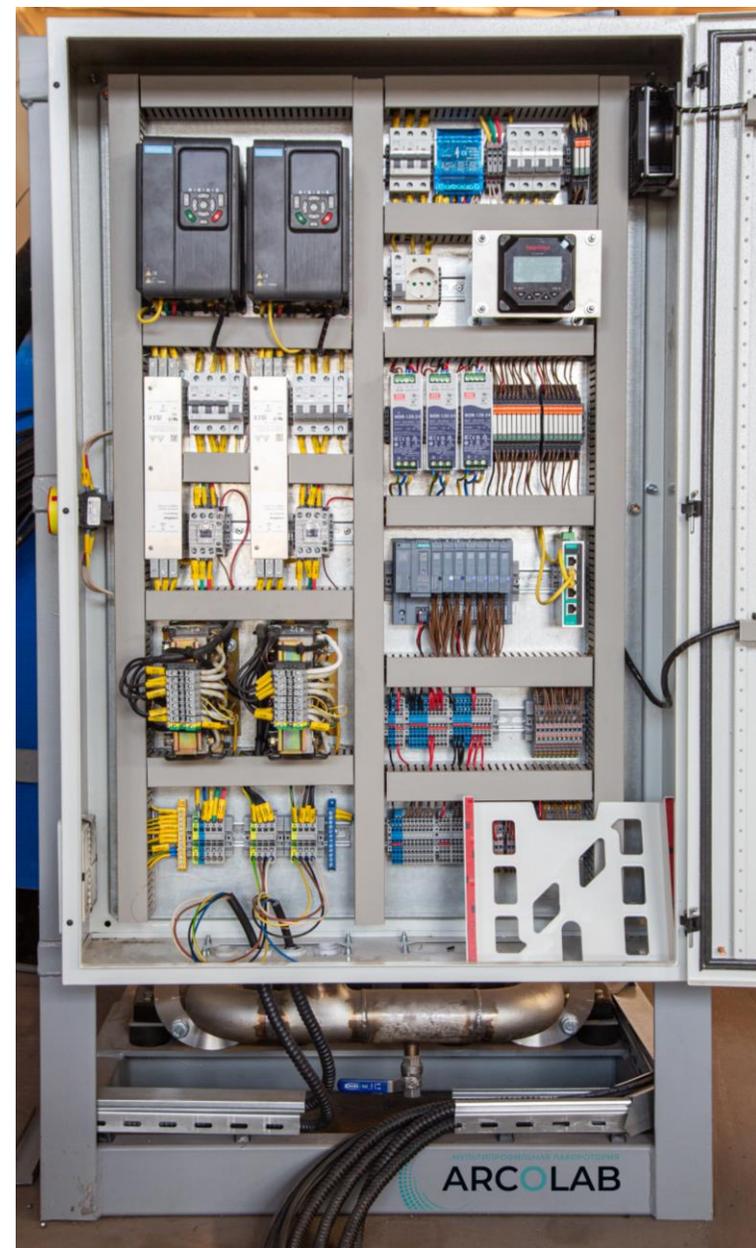
Трассировка



Вакуумные баки



Насосные модули с дублированием и фильтрационными системами



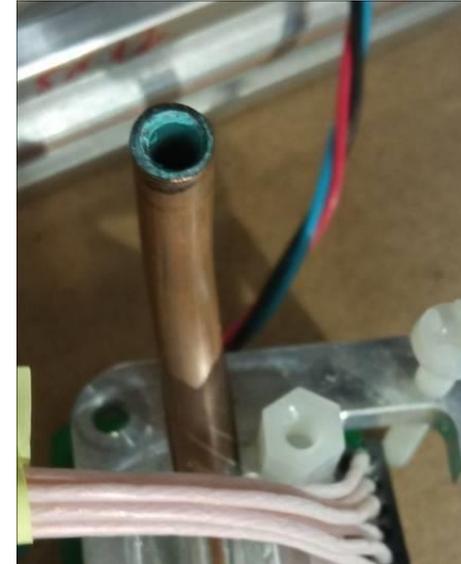
Шафы электроники

Некоторые заметки

- Материалы труб не должны образовывать гальваническую пару (Al и Cu);
- Термостабилизация линии подачи газа представляет серьезную проблему;
- Нужна защита от бактерий и водорослей.



Модель линии подачи



Медная и алюминиевая трубка после 135 часов непрерывной прокачки дистиллированной воды по медно-алюминиевому контуру

Выводы

- Экспериментальные измерения расходно-напорных характеристик системы охлаждения МРД совпадают с численными оценками, что повышает вероятность корректных расчетов всей системы охлаждения и термостабилизации;
- Расчеты с использованием САД-программ позволили добиться конфигурации, соответствующей требованиям leakless;
- Проведенные стендовые испытания лягут в основу автоматизированных алгоритмов термостабилизации.

Спасибо за внимание!

BSU INP:

Ilya Zur,
Alexei Kunz,
Yaroslav Galkin
Julia Fedotova
Vladimir
Tchekhovski
Maria Medvedeva
Julia Shafarevich

ArcoLab:

Alexander Shish,
Vladimir Senkevich,
Mikhail Vaschilenko,
Kirill Levkov
Alexander Galuza
Alexander Novikov

JINR:

Alexander Fedotov,
Alexander Makarov,
Gleb Mescheryakov,
Sergei Movchan,
Igor Balashov,
Vyacheslav
Samsonov