

# Гидродинамические расчеты

---

состояние дел на 05.02.2023

# Цель

---

- Уточнение расхода воды и падения давления на контурах ТРС и ЕСАЛ;
- Оценка тепловых режимов работы систем ТРС и ЕСАЛ.

# Задачи

---

- Построить физико-математические модели контуров охлаждения и термостабилизации;
- Определить штатные режимы функционирования контуров;
- Построить инженерные модели для использования в проектировании подводов и отводов воды.

# Использованные модели



Аналитические оценки:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho$$

$$\Delta h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$f$  – коэффициент трения Дарси,  
 $L$  – длина участка,  
 $D$  – гидравлический диаметр,  
 $V$  – скорость течения жидкости,  
 $\rho$  – плотность жидкости.

Коэффициент трения  $f$  из уравнения Колбрука-Уайта:

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

+местные сопротивления



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

$\vec{u}$  – скорость,  
 $T_l$  – температура воды,  
 $T_s$  – температура твердого тела,  
 $\nabla P$  – градиент давления жидкости,  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  
 $c$  – теплоемкость.



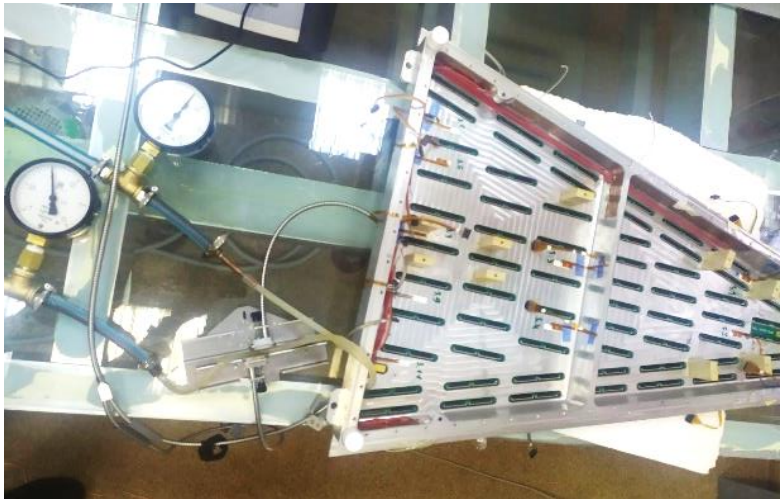
$$\Delta p_{f,A} = \frac{64\nu}{2D^2 S} \frac{L + L_{\text{add}}}{2} \dot{m}_A$$

$$\Delta p_{f,B} = \frac{64\nu}{2D^2 S} \frac{L + L_{\text{add}}}{2} \dot{m}_B$$

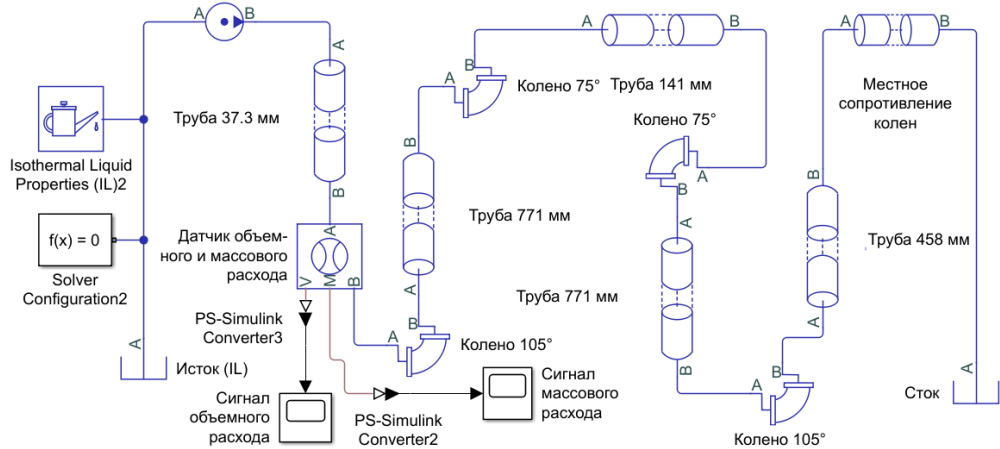
$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = 0$$

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  
 $S$  – площадь сечения трубы,  
 $L_{\text{add}}$  – суммарная длина сопротивлений,  
 $\dot{m}_A$  – массовый расход через порт входа,  
 $\dot{m}_B$  – массовый расход через порт выхода

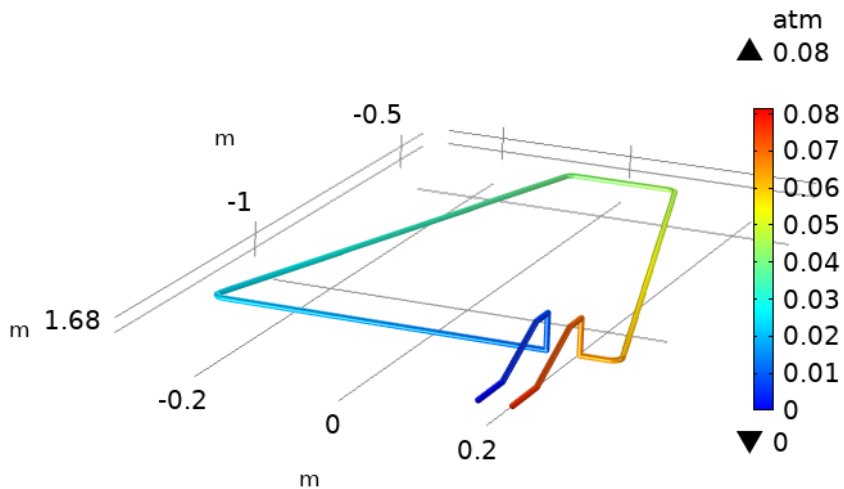
# Верификация



Камера ROC, 40-й корпус



Гидродинамическая схема Simscare



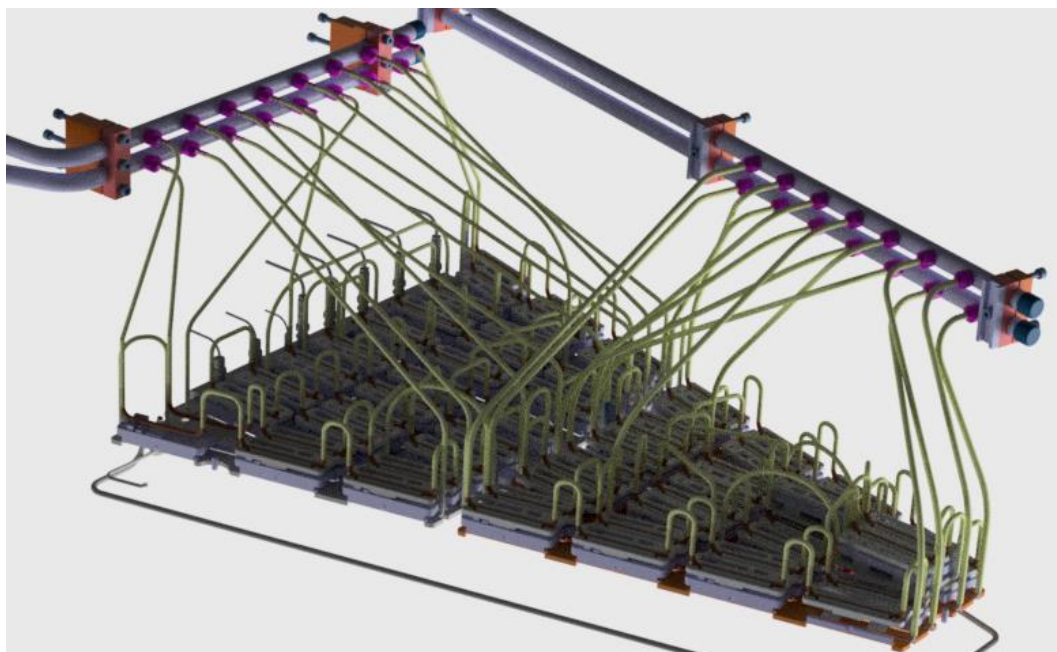
Модель в COMSOL

Система	Расход, л/ч	Падение давления, кПа
COMSOL	22	6
Simscare	22	6
Эксперимент	20	6

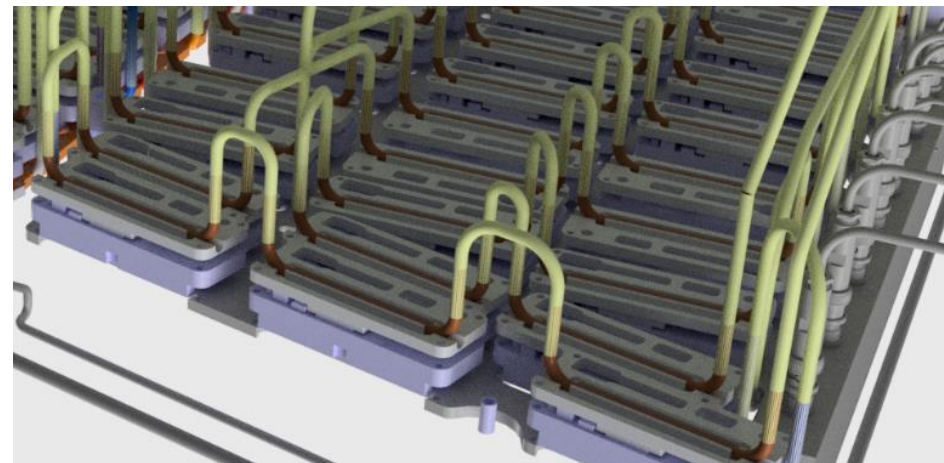
Определен коэффициент эквивалентных потерь по длине! От 10%

# Задачи по контурам

# Контуры SAMPA и FPGA

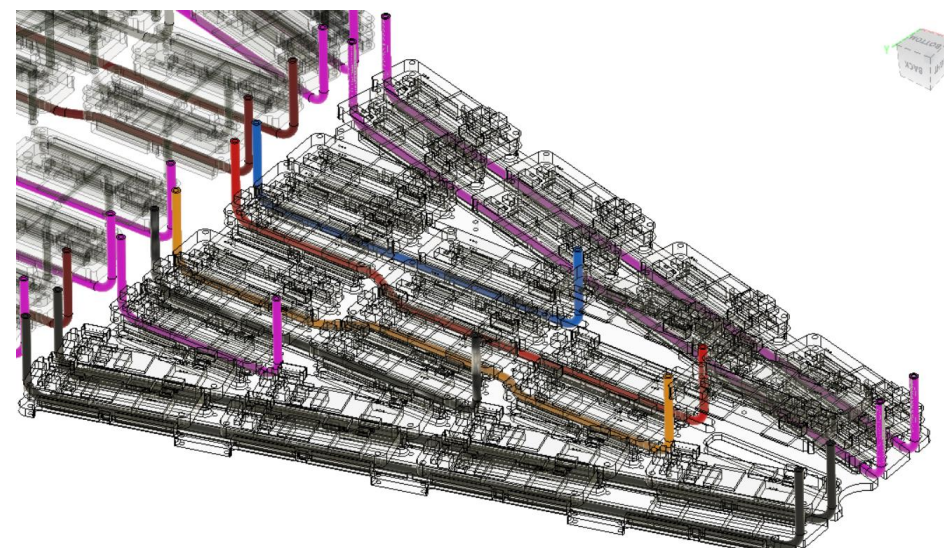


ROC камера



Трубки FPGA контуров

И SAMPA, и FPGA подключены в актуальной модели к одним манифольдам, перепад  $\Delta P=0.4$  атм



Трубки SAMPA контуров

# Модель SAMPA и FPGA

## Гидродинамические схемы контуров

### Схема подконтура FPGA

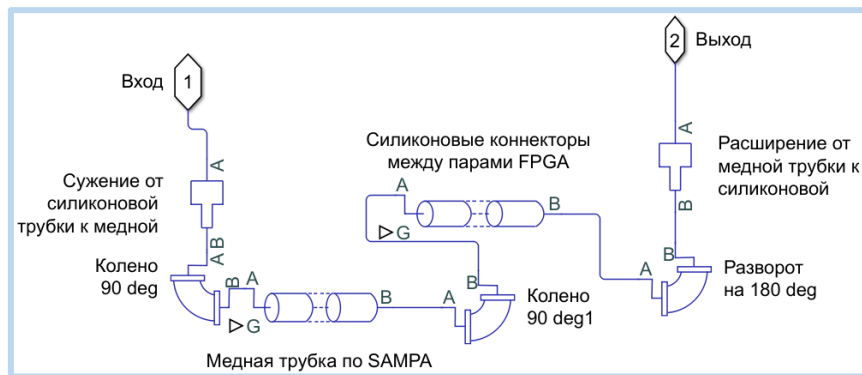


Схема системы охлаждения одной платы FPGA

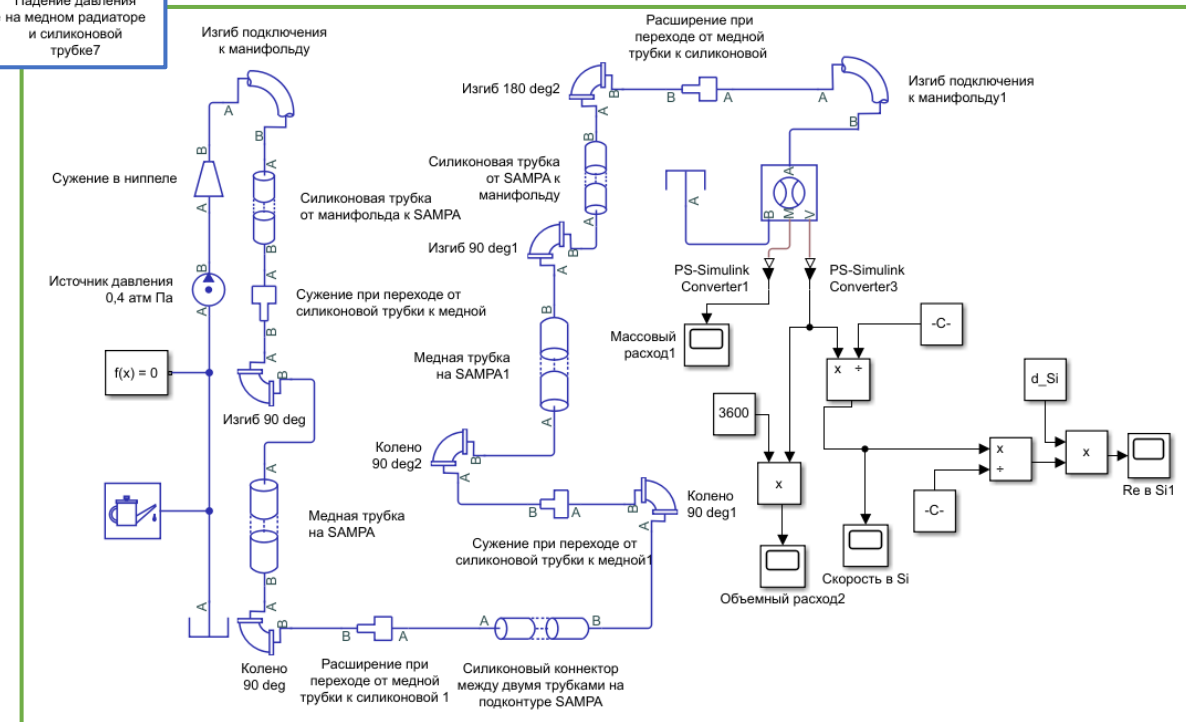


Схема подконтура SAMPA

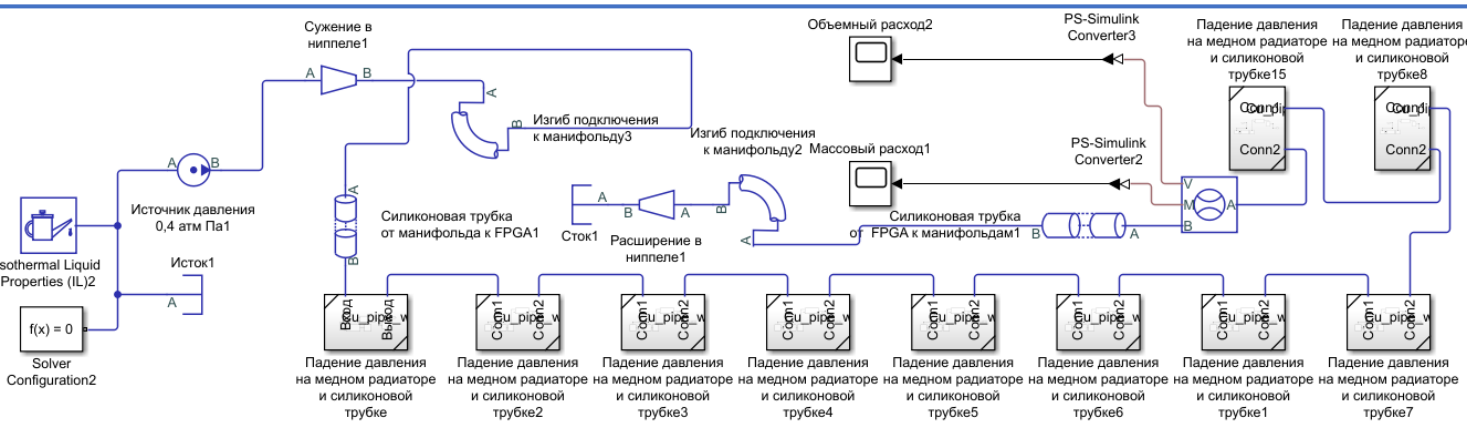
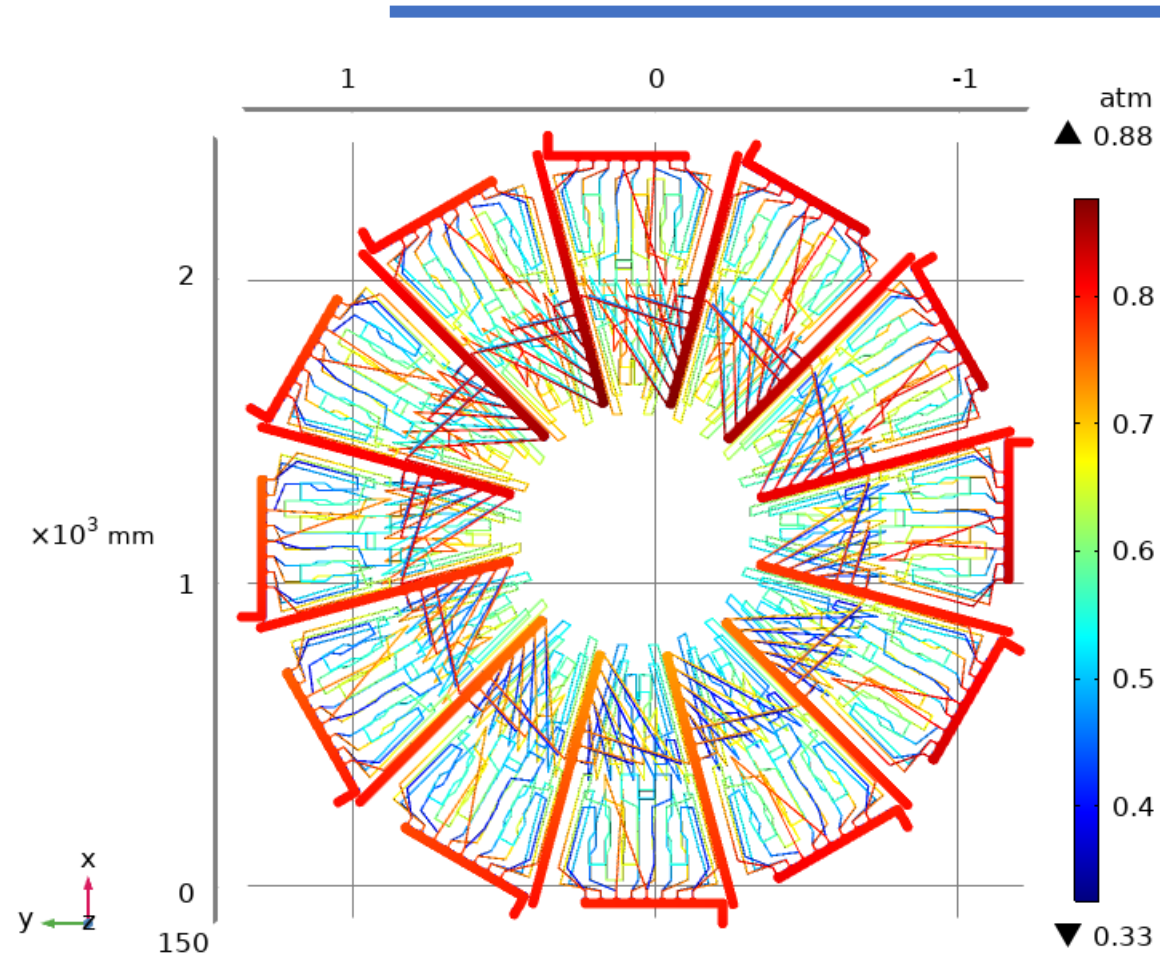


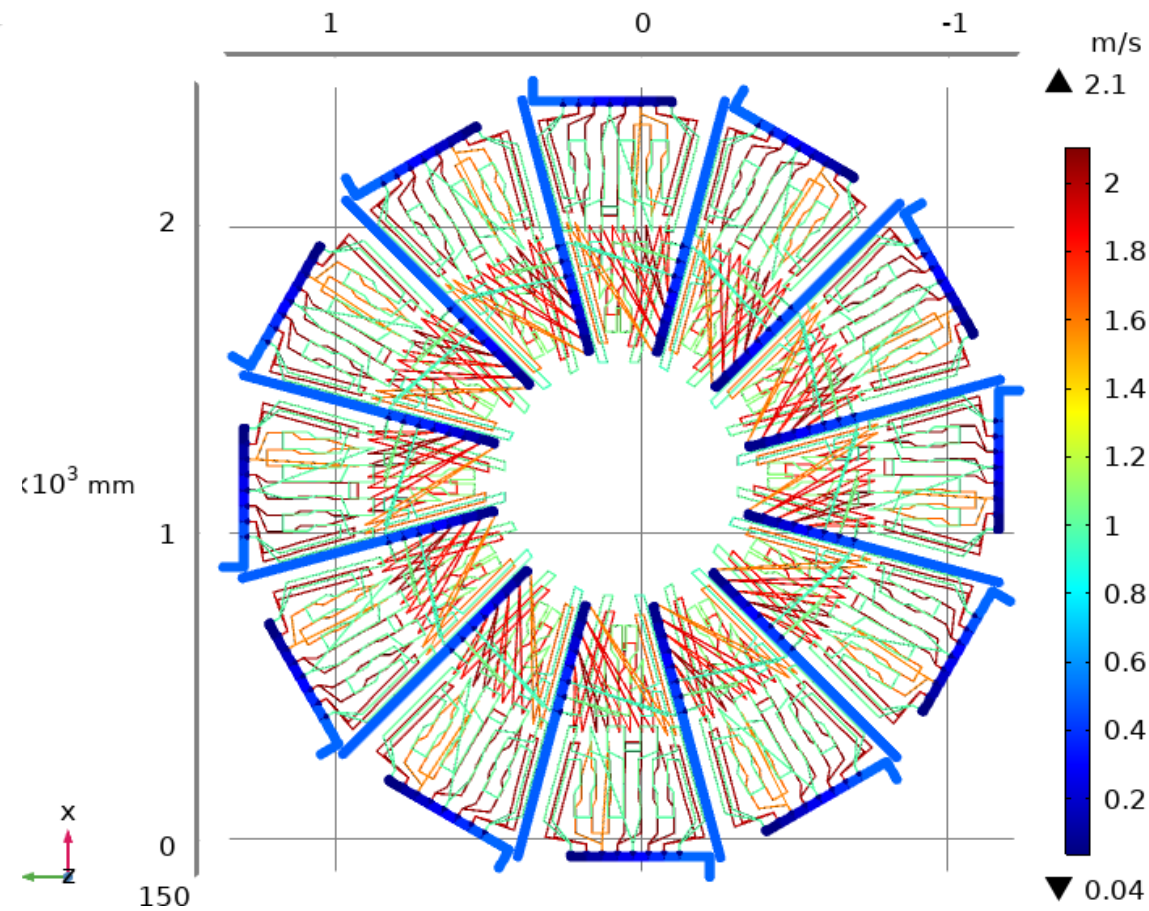
Схема подконтура SAMPA

# Модель SAMPA и FPGA



Поле давления в контурах SAMPA и FPGA

Давление: 0,88...0,33 атм



Скорость носителя в контурах SAMPA и FPGA

Скорость: 2,1...0,04 м/с



# Модель SAMPA и FPGA

Средние расход, скорость, число Re в системе SAMPA+FPGA

	Техническое задание, м <sup>3</sup> /ч	COMSOL, м <sup>3</sup> /ч	Simscape, м <sup>3</sup> /ч	u, м/с	Re
<b>SAMPA+FPGA</b>	10,4	17,14	14,5		
<b>SAMPA</b>	5,2	12,1	8,6	1,89	6258
<b>FPGA</b>	5,2	4,03	5,04	1,0	3337

1. На SAMPA обеспечивается лучше расход воды, чем планировалось.

*Причина:* система термостаб. на стадии ТЗ планировалась по конструкции близкой к FPGA, но затем изменена на более эффективную.

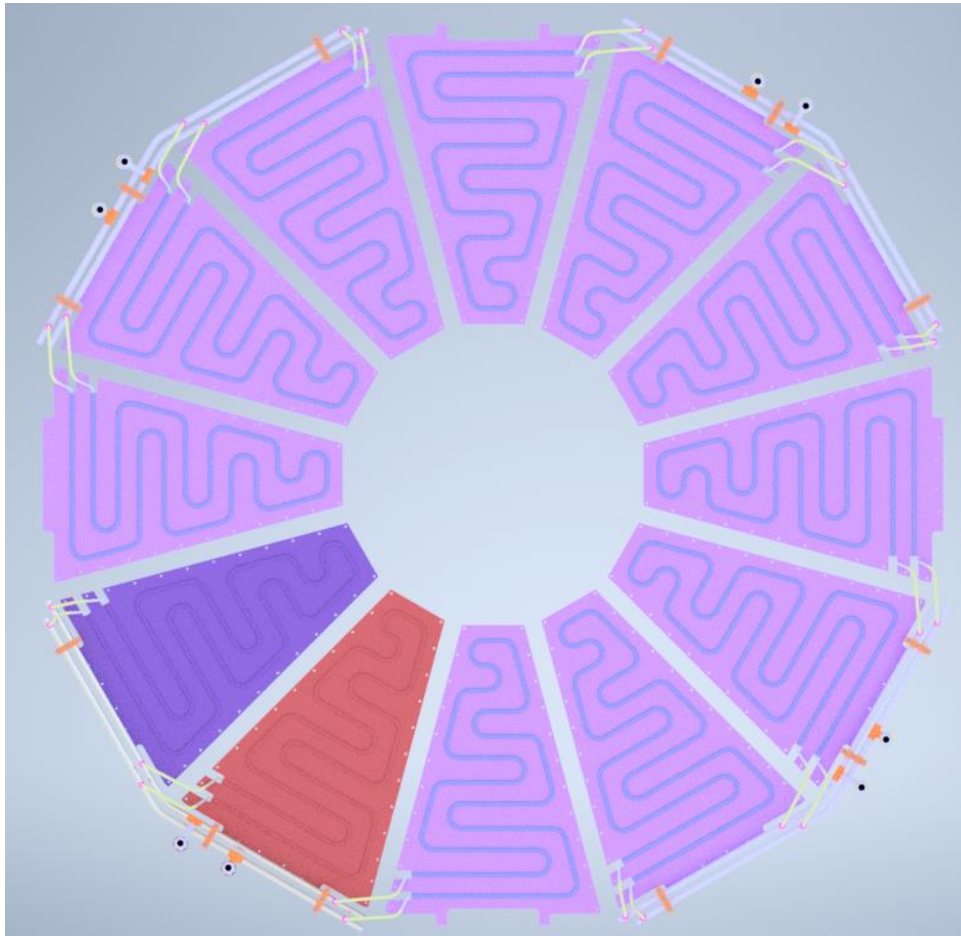
*Последствия:* всё хорошо

2. На FPGA расход может быть меньше, чем в ТЗ на величину до 20%

*Причина:* контур содержит множество разворотов на 180 и имеет большие потери из-за длины по вертикали.

*Последствия:* прогнозируется повышение температуры FPGA на несколько градусов

# Модель фронтального теплового экрана



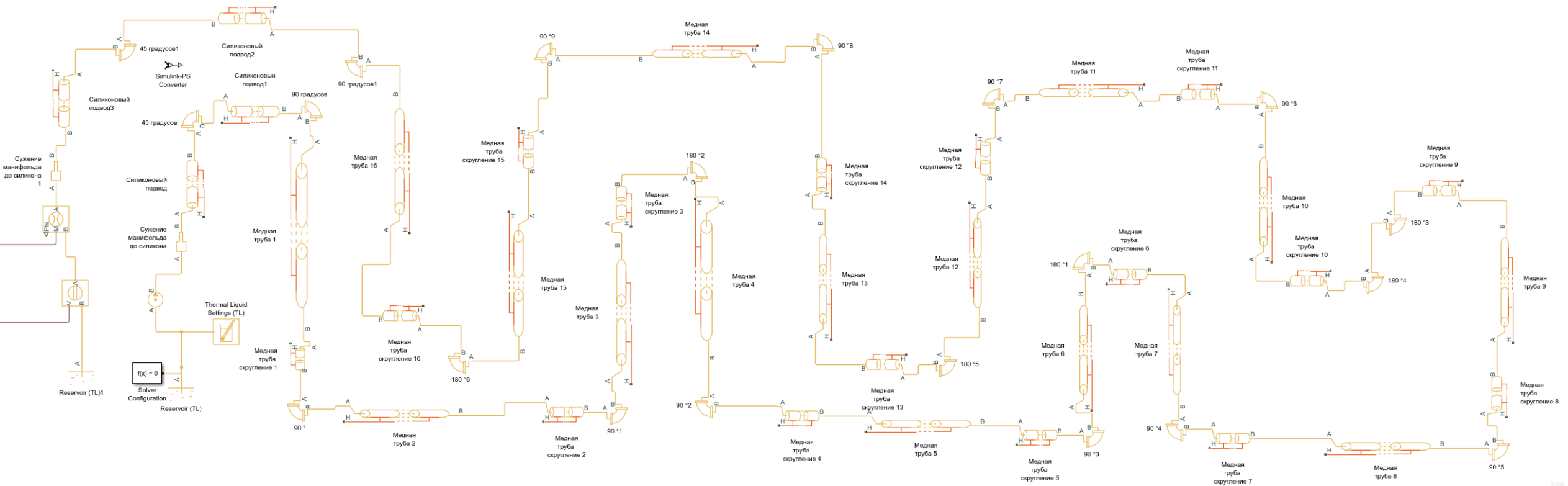
Модель фронтального  
теплового экрана



Панель фронтального  
теплового экрана

Тепловая нагрузка на экран задана параметрически: 100, 500, 1000, 3000 Вт

# Модель фронтального теплового экрана



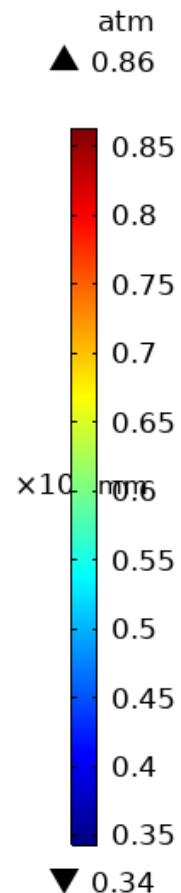
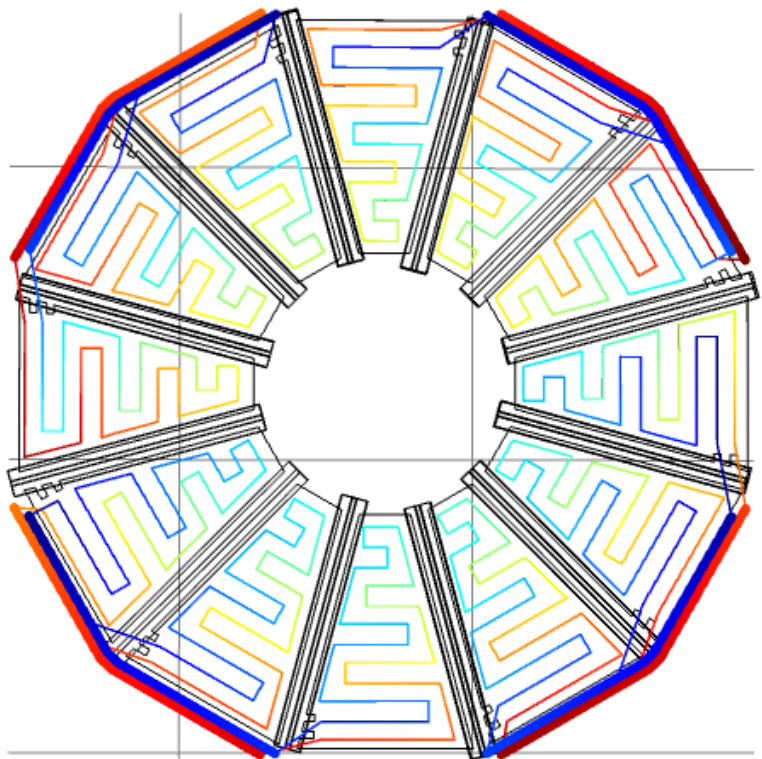
Эквивалентная гидродинамическая схема трубок охлаждения одной панели фронтального теплового экрана

# Модель фронтального теплового экрана

Pheat(4)=3000 W  
mm

Line: Pressure (atm)  
 $\times 10^3$  mm

0 2 1



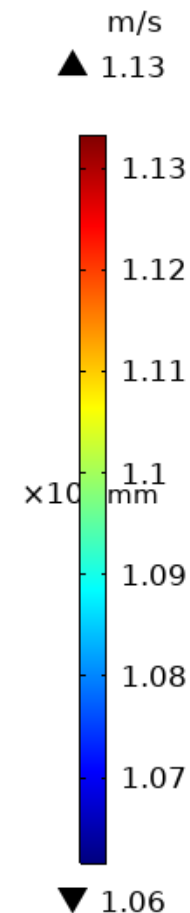
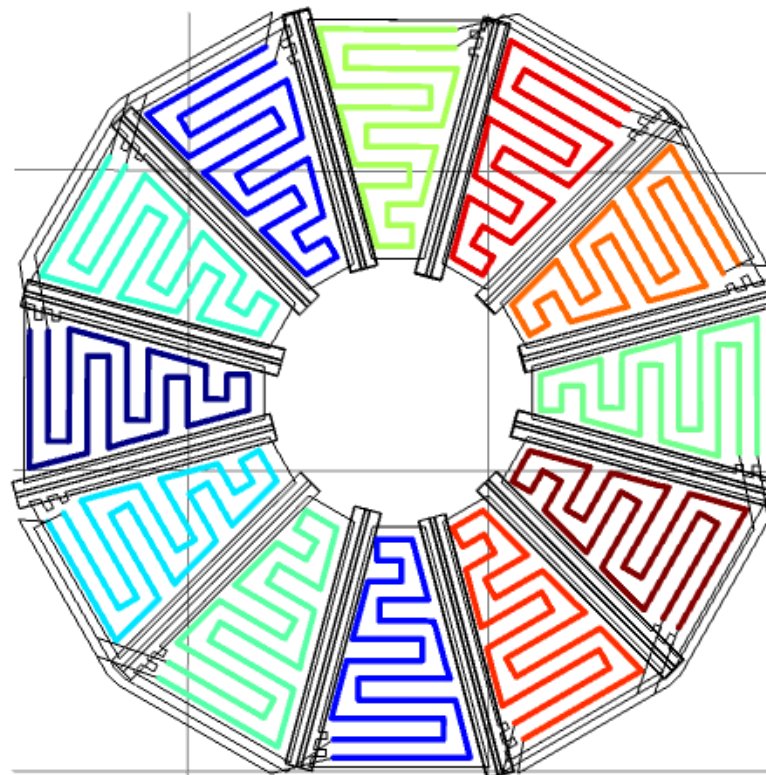
Давление в системе охлаждения фронтального теплового экрана

Давление: 0,86...0,34 атм

Pheat(4)=3000 W  
mm

Line: Velocity magnitude (m/s)  
 $\times 10^3$  mm

0 2 1

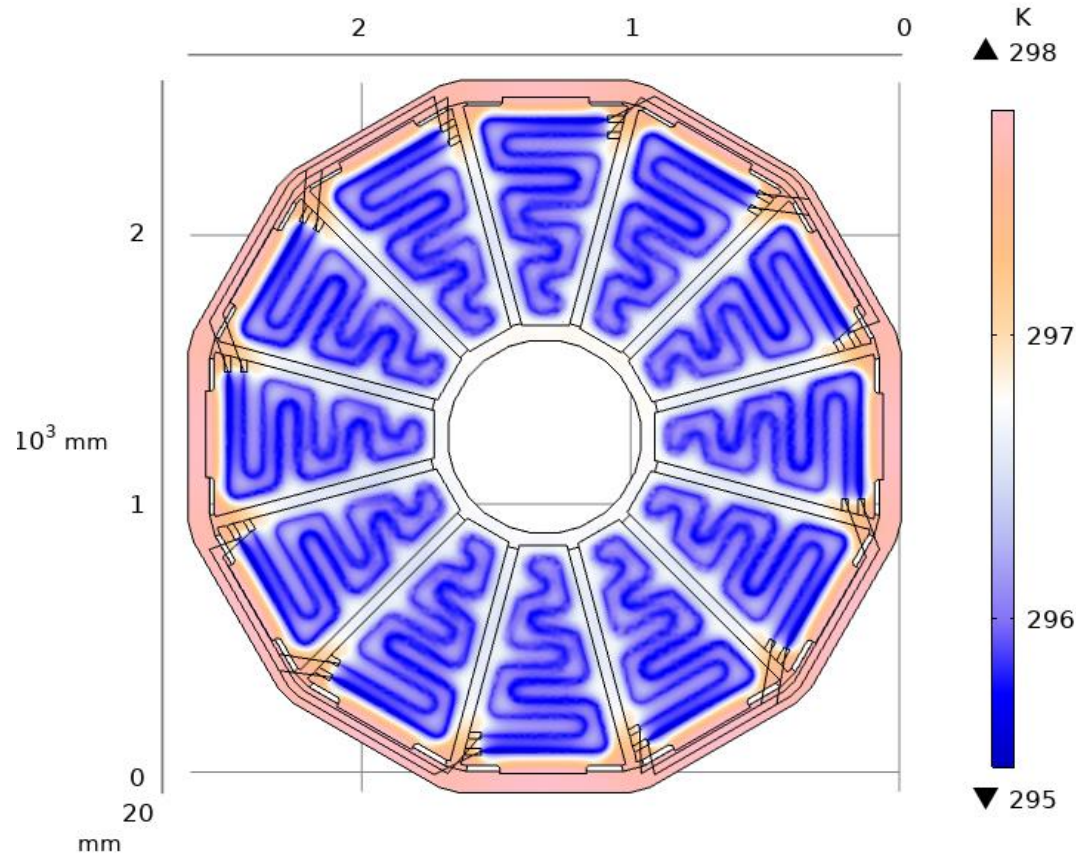


Скорость в системе охлаждения фронтального теплового экрана

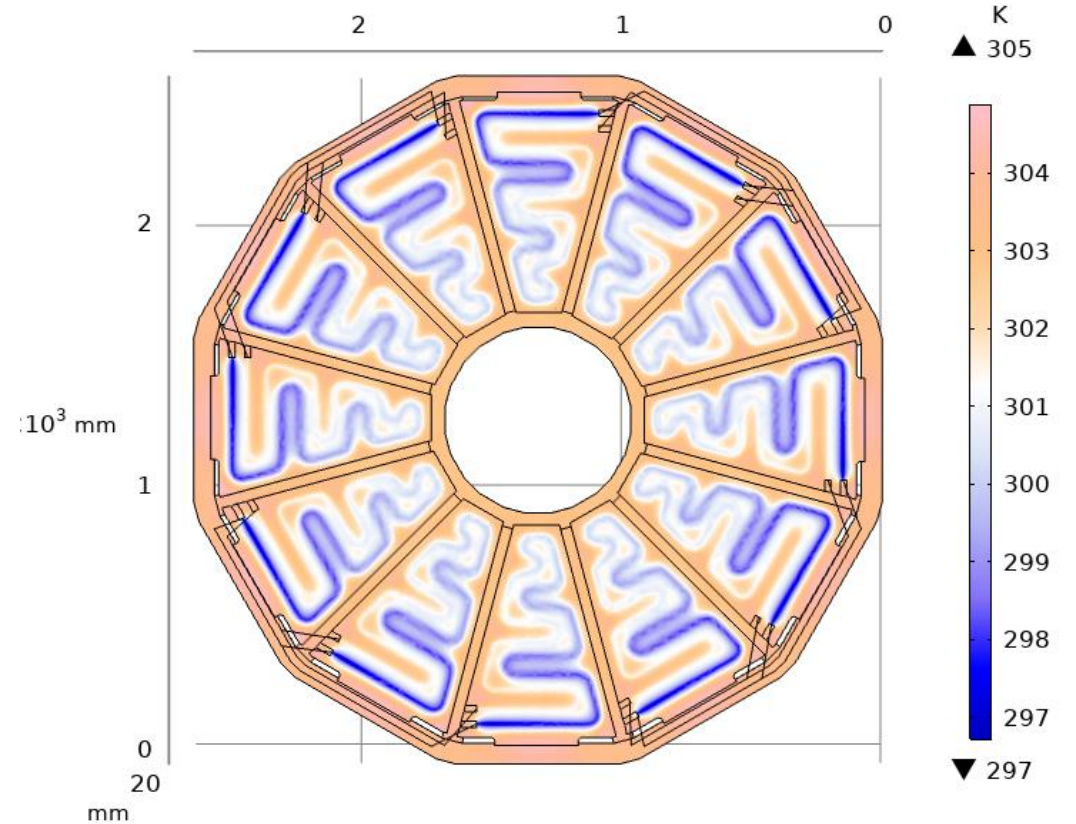
Скорость: 1,06...1,13 м/с

# Модель фронтального теплового экрана

100 Вт тепловой нагрузки



500 Вт тепловой нагрузки



Распределение температуры на фронтальном экране

температура воды 295 К, воздуха 298 К

# Модель фронтального теплового экрана

Полный объемный расход на контур фронтального теплового экрана

	Техническое задание, м <sup>3</sup> /ч	COMSOL, м <sup>3</sup> /ч	Simscape, м <sup>3</sup> /ч
<b>Вся система</b>	2,0	1,6	1,4

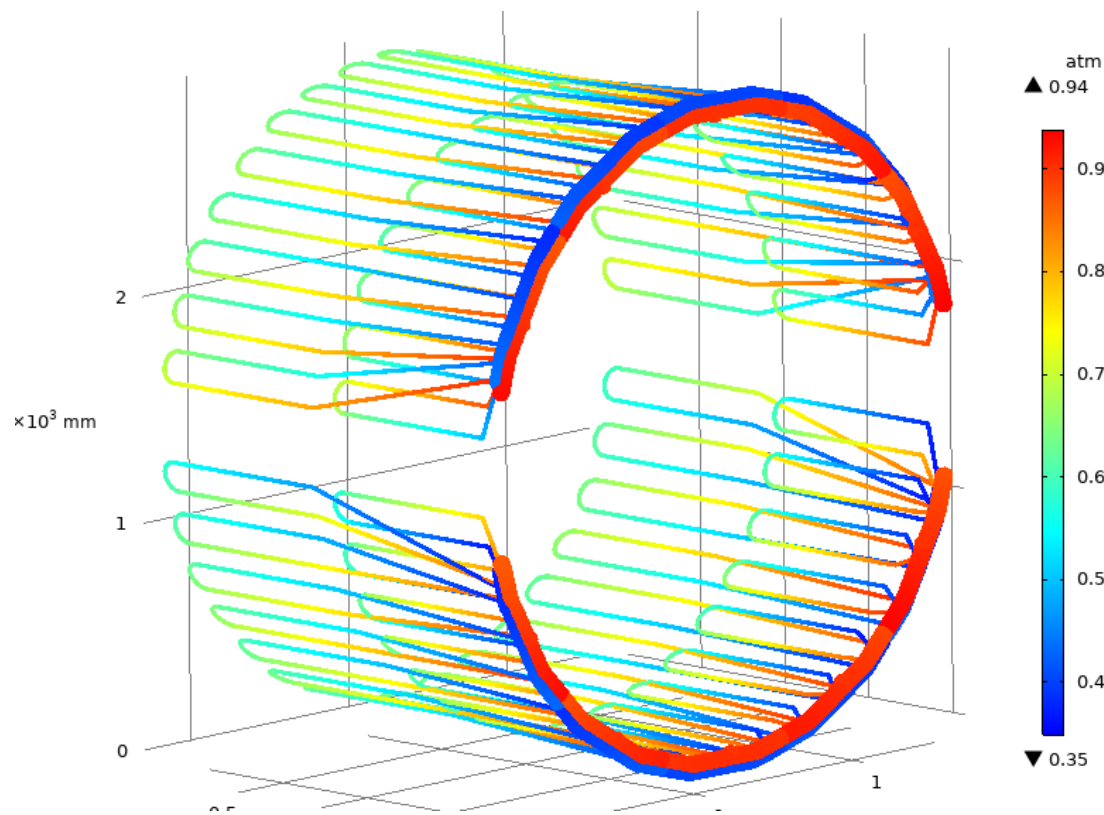
Средний массовый расход на одну панель фронтального теплового экрана

	Техническое задание, кг/с	COMSOL, кг/с	Simscape, кг/с
<b>Одна панель</b>	0,0231	0,0169	0,0156

*Причина:* большое количество колен с большими углами приводит к значительным местным потерям давления.

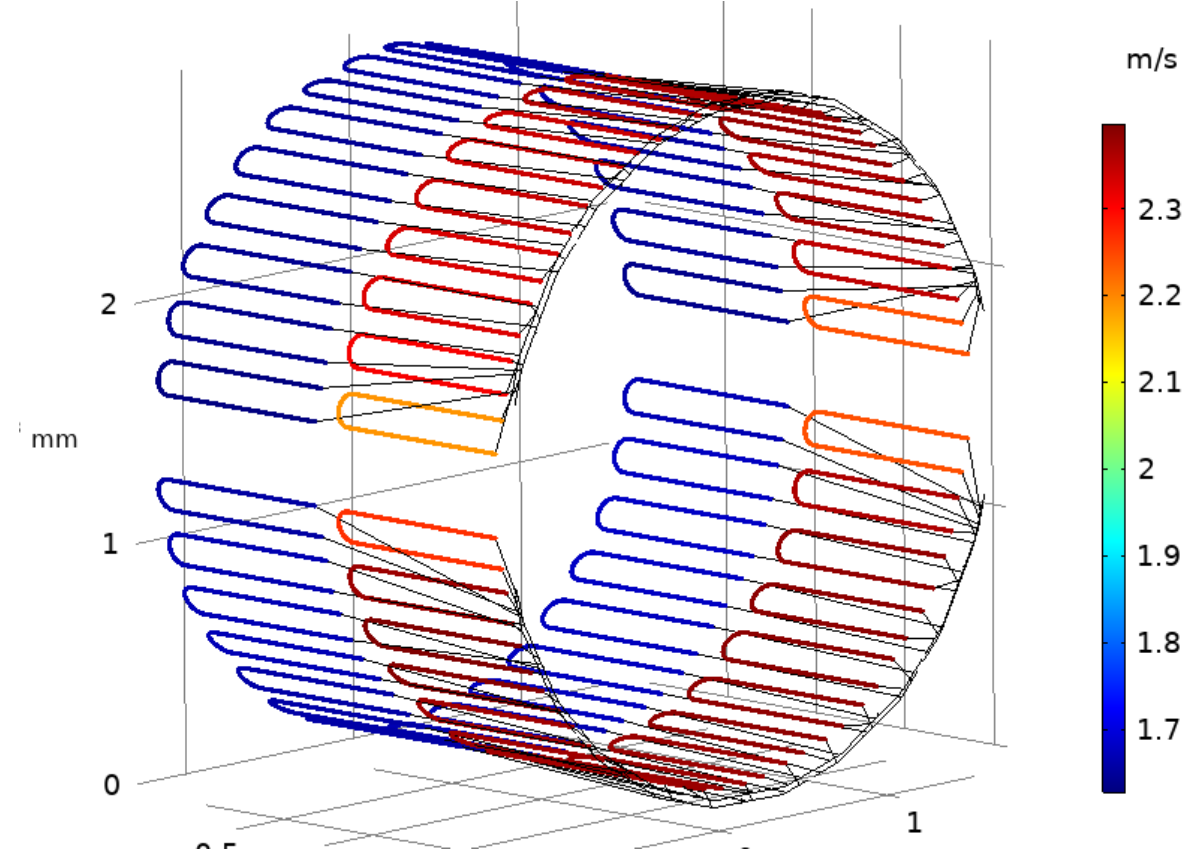
*Последствия:* заниженное значение расхода по сравнению с ТЗ

# Модель внешнего теплового экрана



Давление в системе охлаждения внешнего теплового экрана

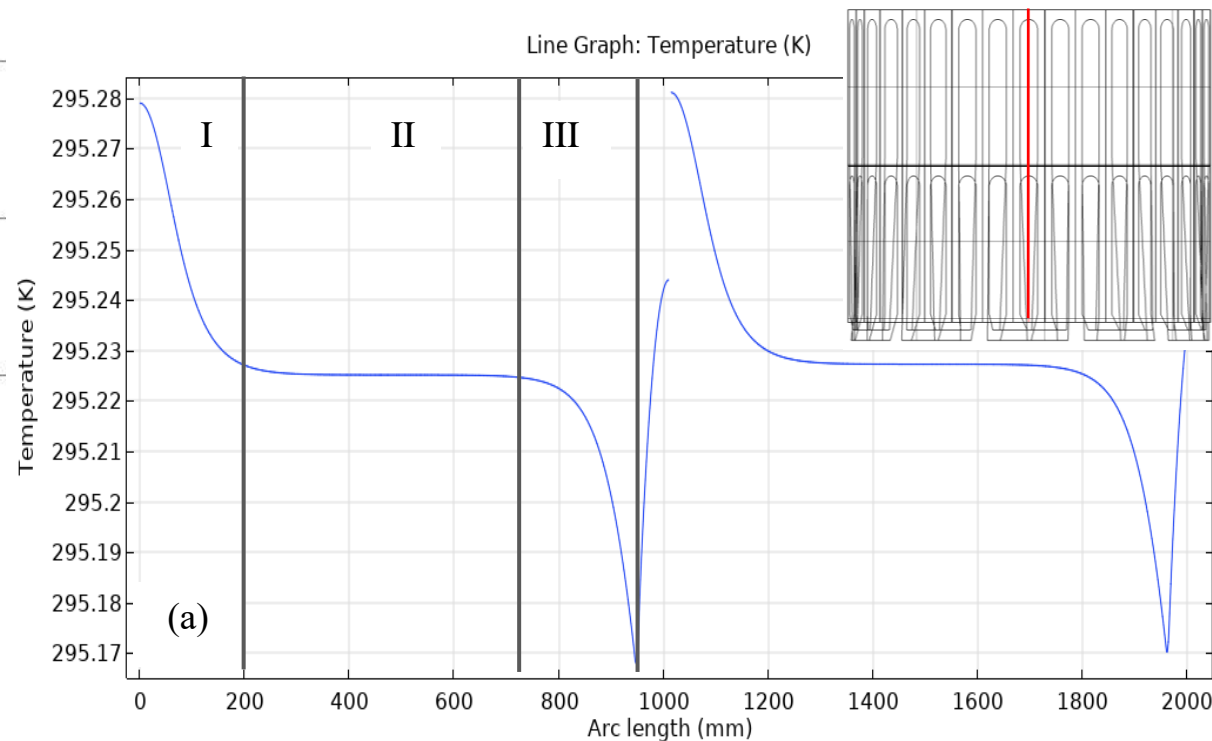
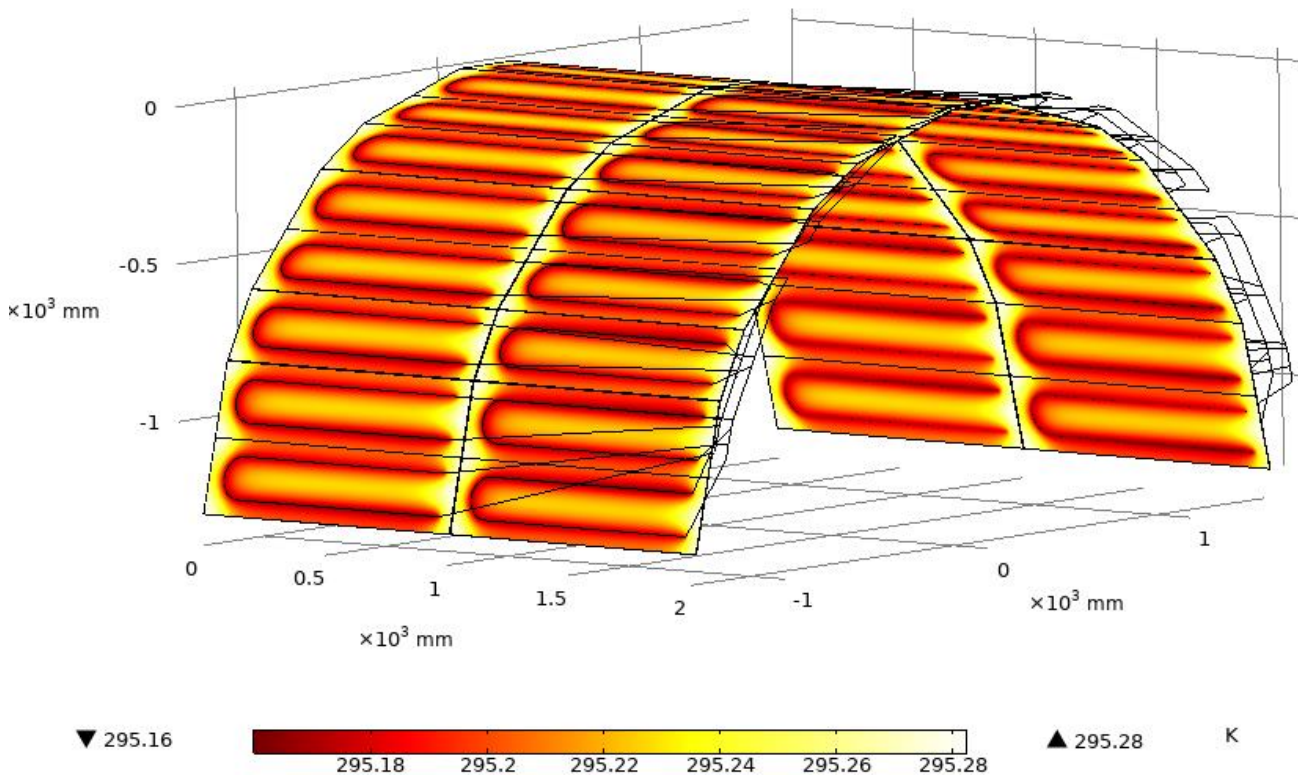
Давление: 0,94...0,35 атм



Скорость в системе охлаждения внешнего теплового экрана

Скорость: 2,3...1,7 м/с

# Модель внешнего теплового экрана



Объёмное распределение температуры внешнего термоэкрана

Линейное продольное распределение температуры внешнего термоэкрана

❖ Магнитуда перепада температур 0,11K при тепловой нагрузке 0,1 кВт

12,4 м<sup>3</sup>/ч согласно расчету, 20,7 м<sup>3</sup>/ч согласно ТЗ



# Стендовые испытания

# Цель стендовых испытаний

---

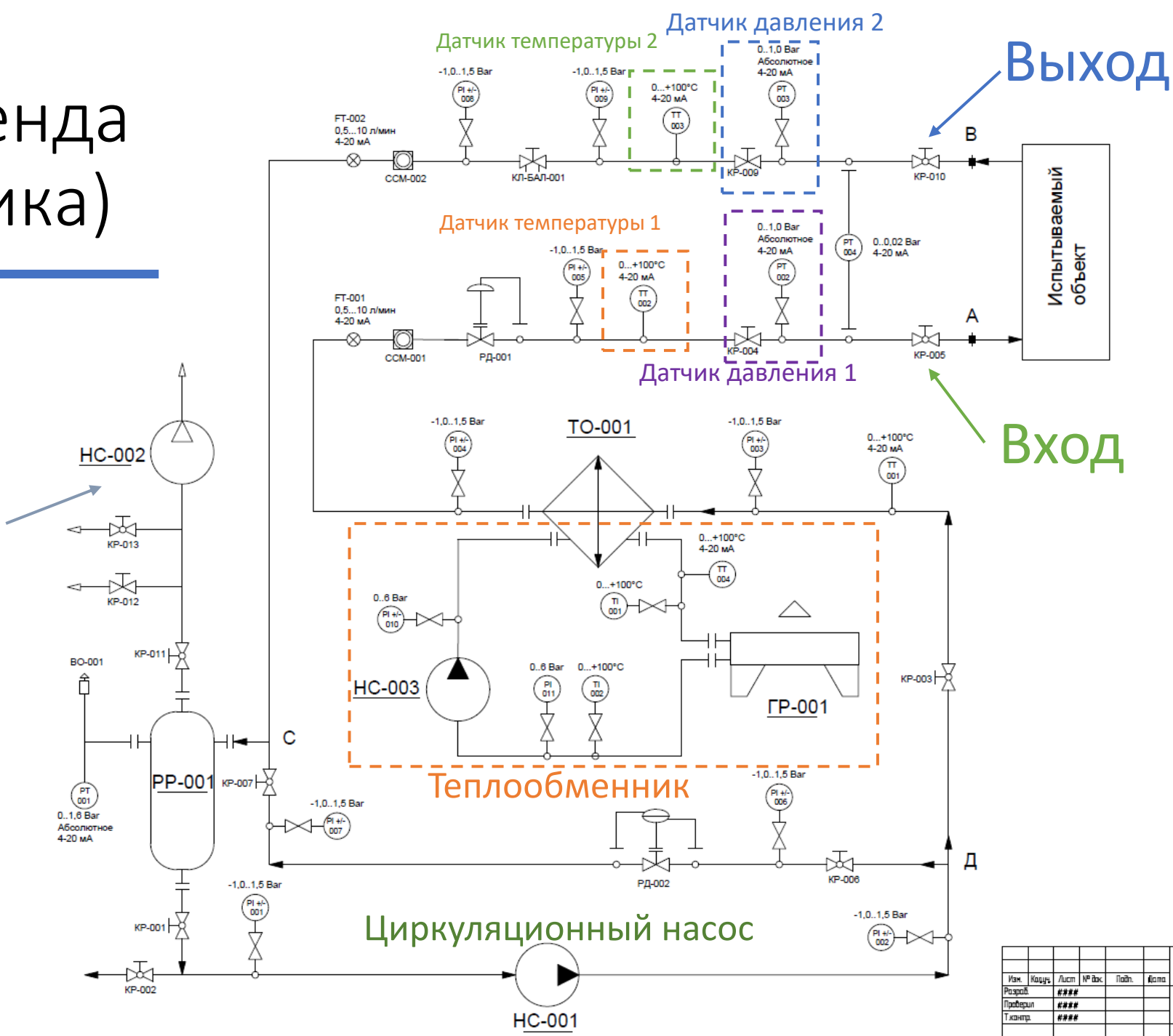
- Определение режимов работы контуров;
- Определение характеристик трубок;
- Проверка методов управления и настройка автоматики.



Фотография стенда

# Схема стенда (гидравлика)

Вакуумный насос



Перечень КИП

Обозначение	Наименование
РД-001	Регулятор давления
РД-002	Регулятор давления
FT-001...FT-002	Расходомер
PI-001...PI-009	Вакуомер
PI-010...PI-011	Монометр
PT-001...PT-003	Преобразователь абсолютного давления
PT-004	Преобразователь разности давления
TI-001...TI-002	Термометр
TT-001...TT-004	Преобразователь температуры

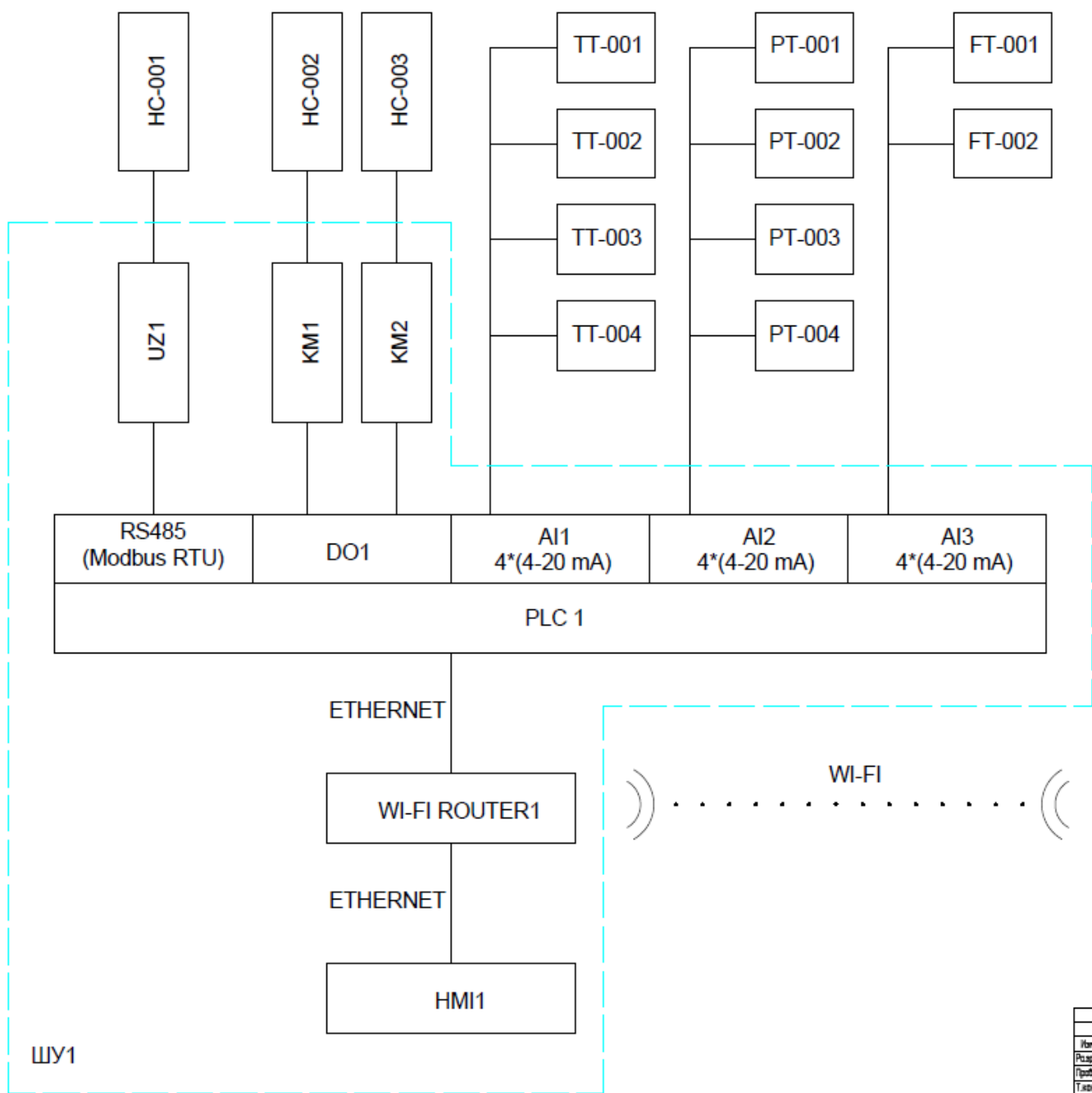
Перечень оборудования

Обозначение	Наименование
ГР-001	Радиатор
НС-001	Насос циркуляционный
НС-002	Насос вакуумный
НС-003	Насос циркуляционный
РР-001	Резервуар вакуумный
ТО-001	Теплообменник

Изм.	Контр.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разработ	###				
Проверен	###				
Т.контр.	###				

Страна	Лист	Листов
Р	2	

# Схема стенда (автоматизация)



Перечень оборудования	
Обозначение	Наименование
HC-001	Насос циркуляционный
HC-002	Насос вакуумный
HC-003	Насос циркуляционный
ШУ1	Шкаф управления стендом
AI1...AI3	Модуль аналоговых входов 4*(4-20 mA)
DO1	Модуль дискретных выходов
FT-001...FT-002	Расходомер
HMI1	Панель оператора
KM1...KM2	Контактор
PC1	Персональный компьютер
PLC1	Програм. логический контроллер
PT-001...PT-003	Преобразователь абсолютного давления
PT-004	Преобразователь разности давления
RS485	Интерфейсн. модуль RS485(Modbus RTU)
TT-001...TT-004	Преобразователь температуры
UZ1	Преобразователь частоты
WIFI ROUTER1...2	Wi-Fi роутер

ШУ1

Изм.	Кол-во	Лист	ИР	Факт	Итого	Создан	Лист	Листов
Разработ.	###					P	2	###
Проверил	###							
Таблица	###							

## Гидравлика контуров:

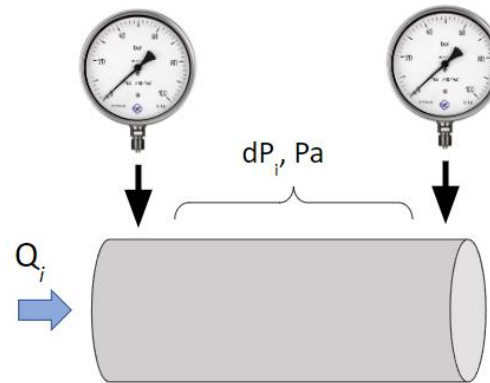
- измерение гидравлического сопротивления контуров при различных **перепадах давления**;
- измерение сопротивления контуров при различных **массовых расходах**.



Тестируемая панель фронтального экрана:

## Потери на трубках и изгибах:

- измерения шероховатости трубок;
- измерение местных сопротивлений на изгибах и фиттингах.



Пример эксперимента: измерение давления при фиксированном расходе

## Теплофизические эксперименты:

- оценка эффективности теплосъема с контуров.

## Опции автоматизации:

- Компьютерное управление кранами;
- авторегуляция байпасса для выставления массового расхода;
- автоматизированное получение данных эксперимента в формате электронных таблиц.

Спасибо за внимание!

Дополнительный слайд. Все по FPGA/SAMPA

---