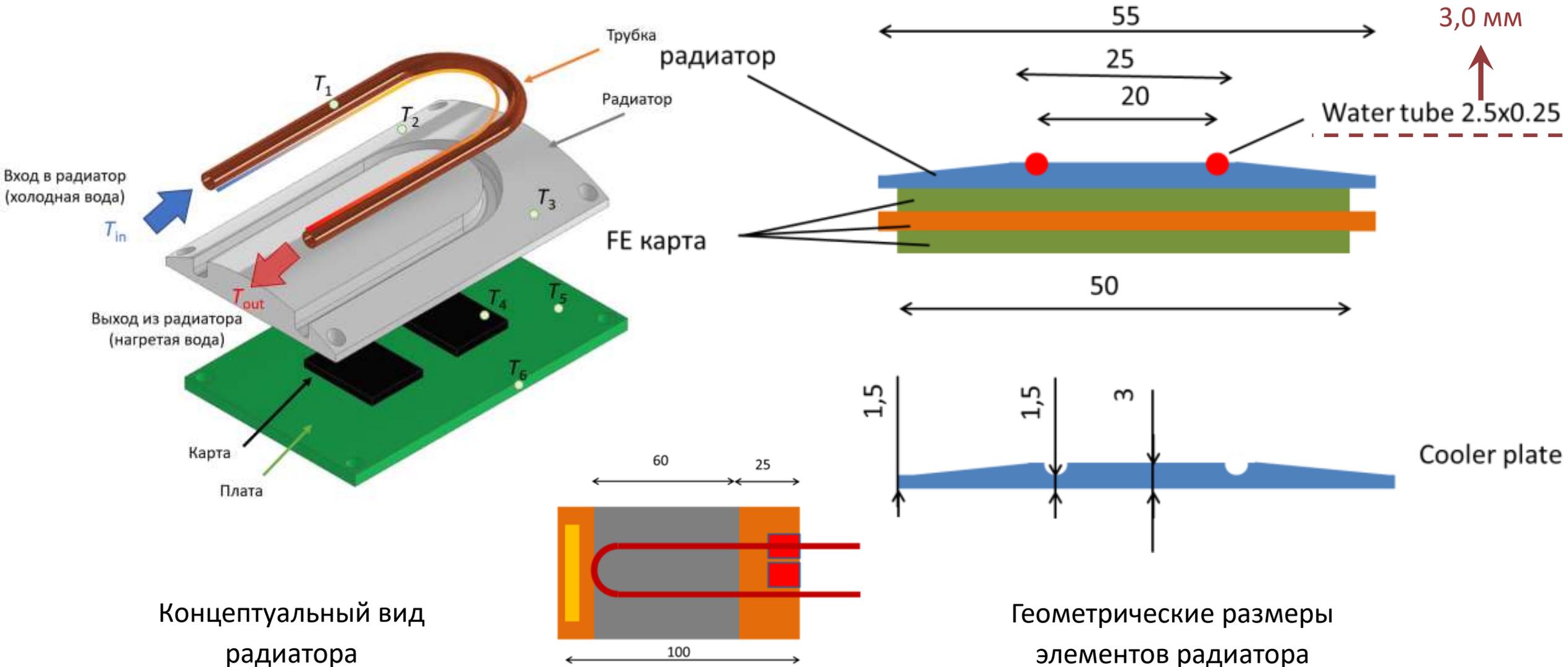


Гидродинамический расчёт системы охлаждения электроники *MicroMEGAS*

17.07.2025

Зур Илья Александрович
Федотов Александр Сергеевич

Исходные данные. Геометрия радиатора и трубки

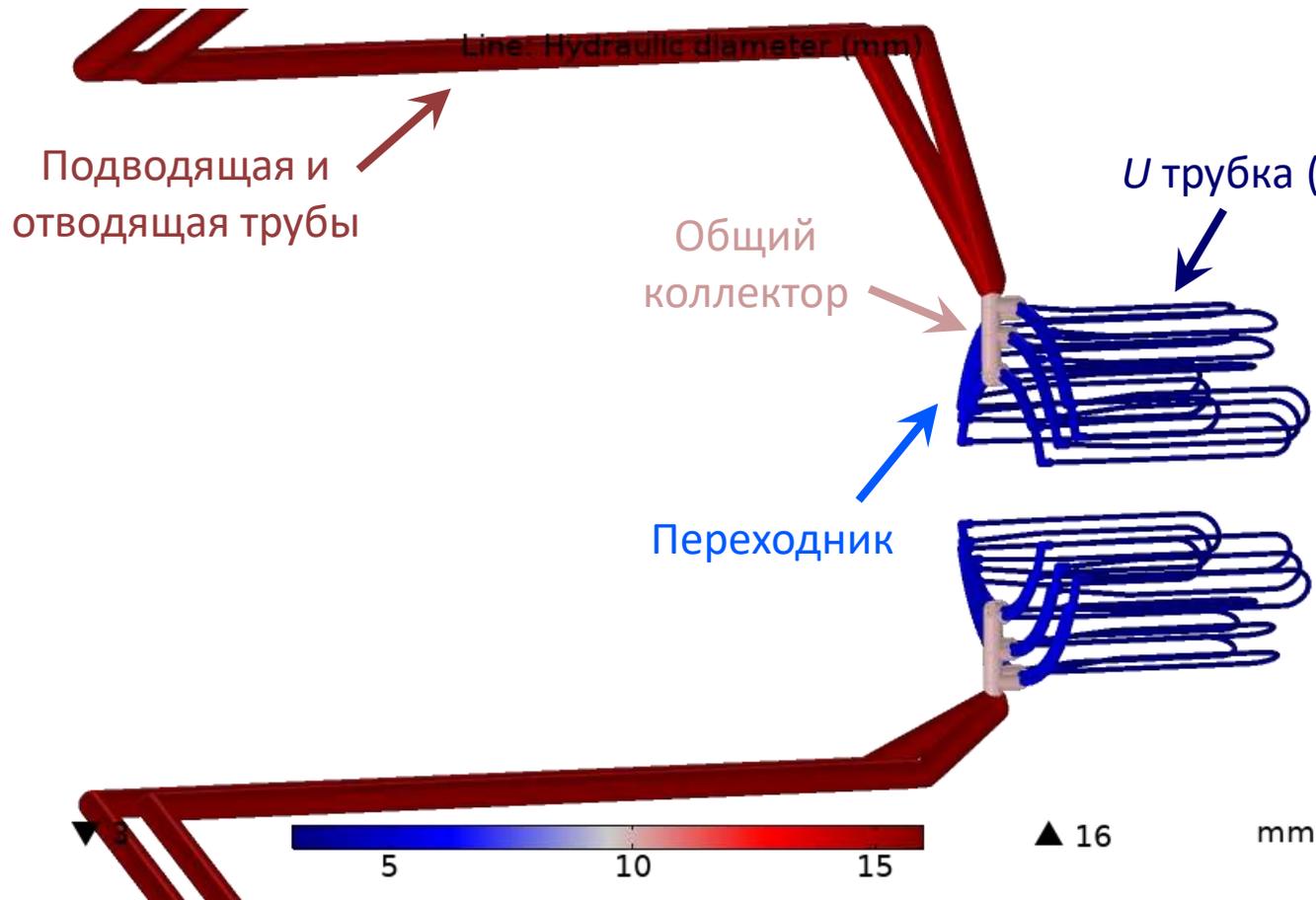


Концептуальный вид радиатора

Геометрические размеры элементов радиатора

Все «слои» манифольдов подключаются к *одному* коллектору

Радиаторы подключаются к манифольдам *параллельно*



- Форма манифольдов – дуга

- Внутренний диаметр труб:

- Подводы/отводы 16мм;
- коллектор - 10,0 мм;
- манифольд - 5,0 мм;
- переходник - 3,5 мм;
- **радиатор - 3,0 мм.**

Динамика течения хладоносителя описывалась уравнениями Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в гравитационном поле.

Гидродинамический анализ

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \frac{1}{2} f_D \frac{|u| \vec{u}}{d} + \vec{f}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

где \vec{u} и ∇P – локальная скорость и градиент давления жидкости, f_D – фактор Дарси; \vec{f} – поле объёмных сил (сила тяжести), T_l – локальная температура теплоносителя (воды); $f_D \frac{|u| \vec{u}}{d}$ – слагаемое, описывающее вязкое трение и потери давления на шероховатостях стенок трубки при развитом параболическом профиле скорости в сечении.

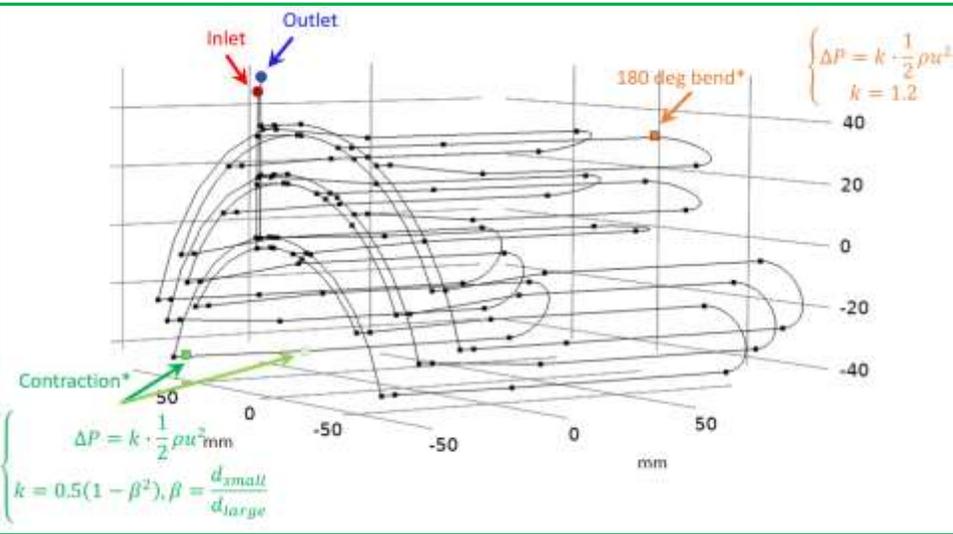
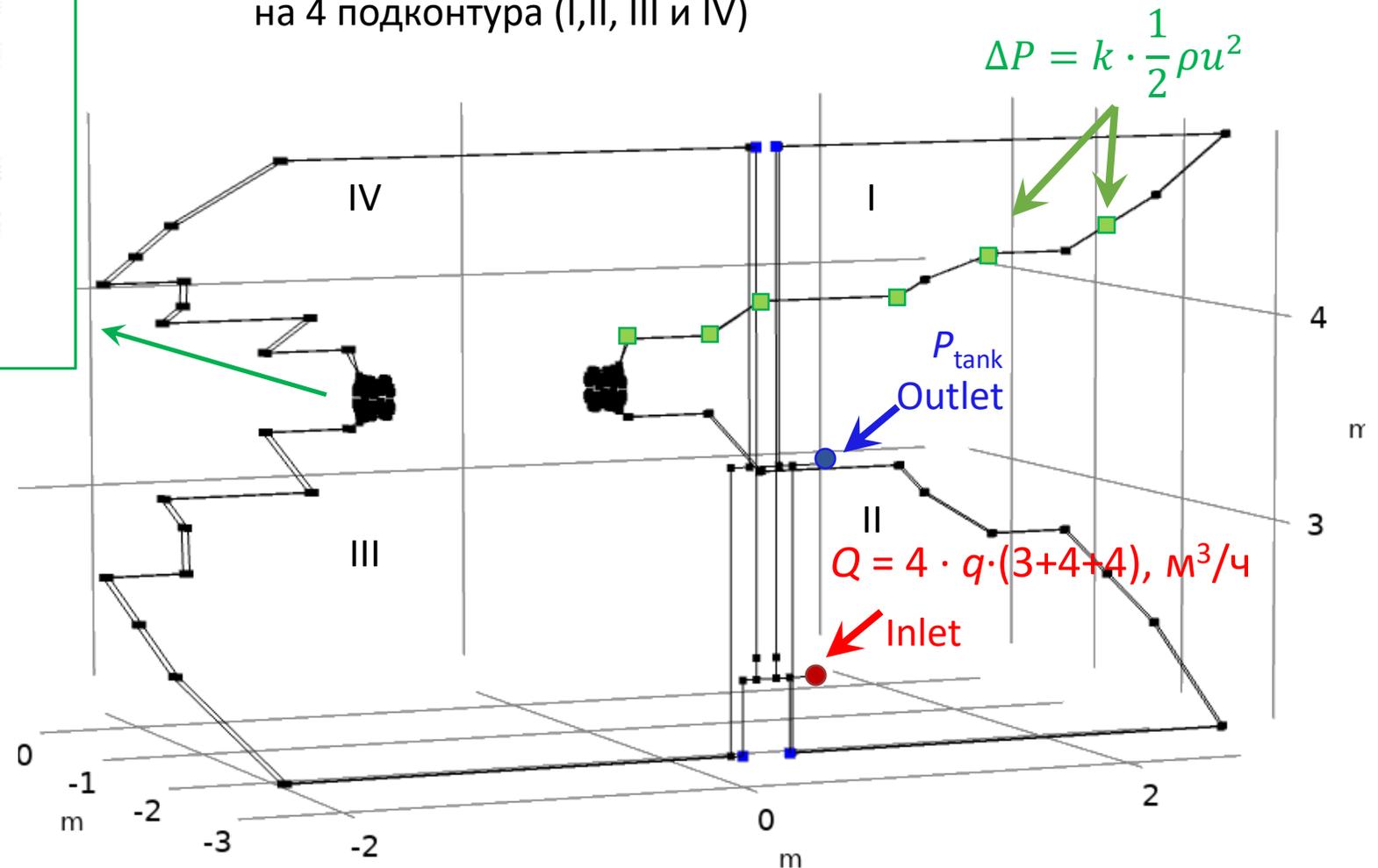
Для описания потерь давления на вязкое трение и потери давления на шероховатостях стенок трубки при развитом параболическом профиле скорости в сечении использовалось уравнение Хааланда ($4 \cdot 10^3 < Re < 1 \cdot 10^8$)

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -1.8 \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} \right)^{1.1} + \frac{6.9}{Re} \right)$$

где $\varepsilon = 0.015$ мм – шероховатость внутренней поверхности стенок трубы;
 d – внутренний диаметр трубы;
 Re – локальное число Рейнольдса в потоке.

Граничные условия. Локальные падения давления

Предлагаем систему условно разделить на 4 подконтура (I, II, III и IV)



Система:

имеет общий раздающий коллектор;

имеет общий вход в бак;

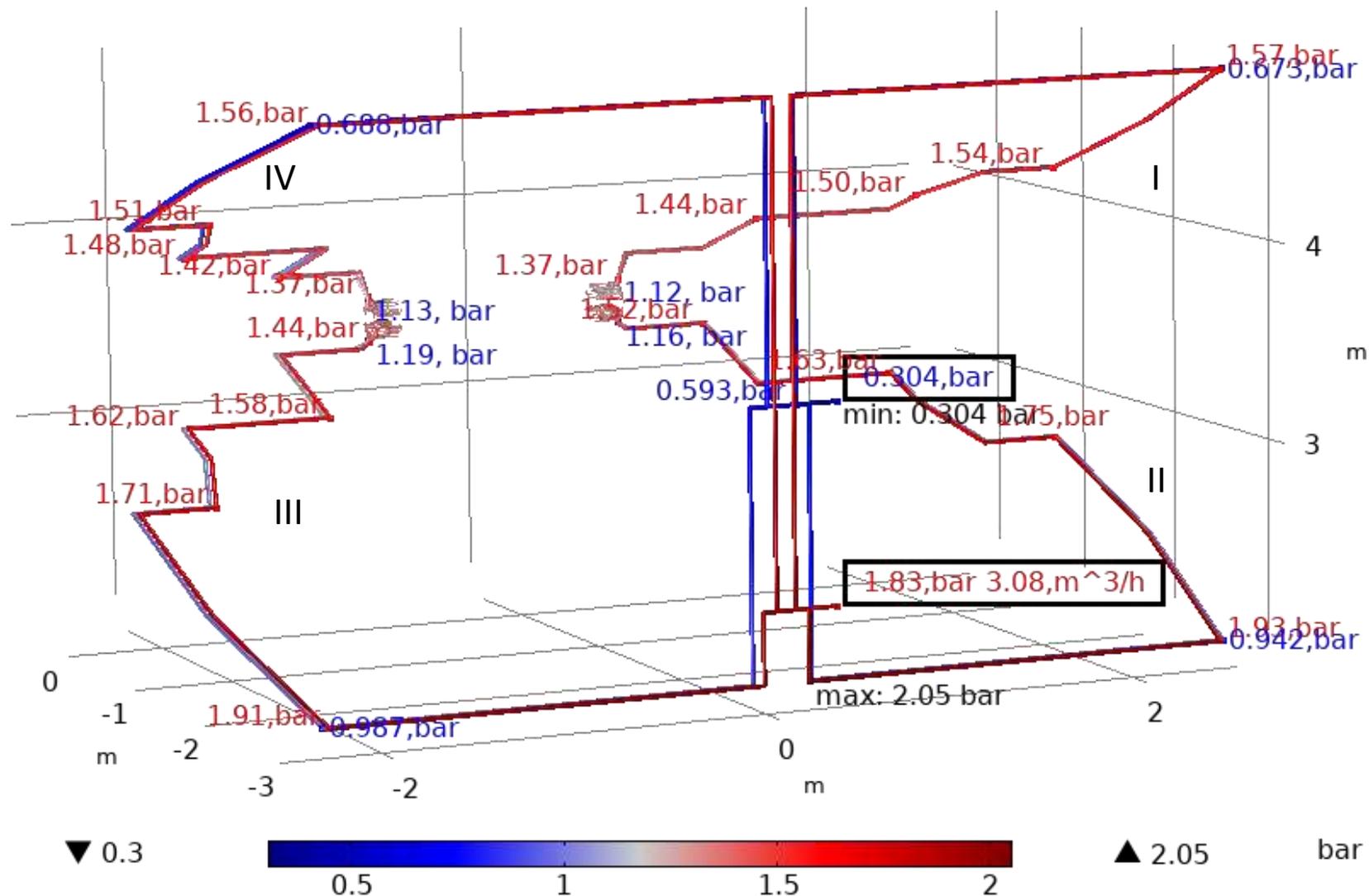
учитывает локальное падение давления.

Результаты. Распределение давления в системе

При среднем расходе $0,07 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметре трубок радиаторов $3,0 \text{ мм}$ и диаметре трубок подводов и отводов $12,0 \text{ мм}$ *leakless* нарушается

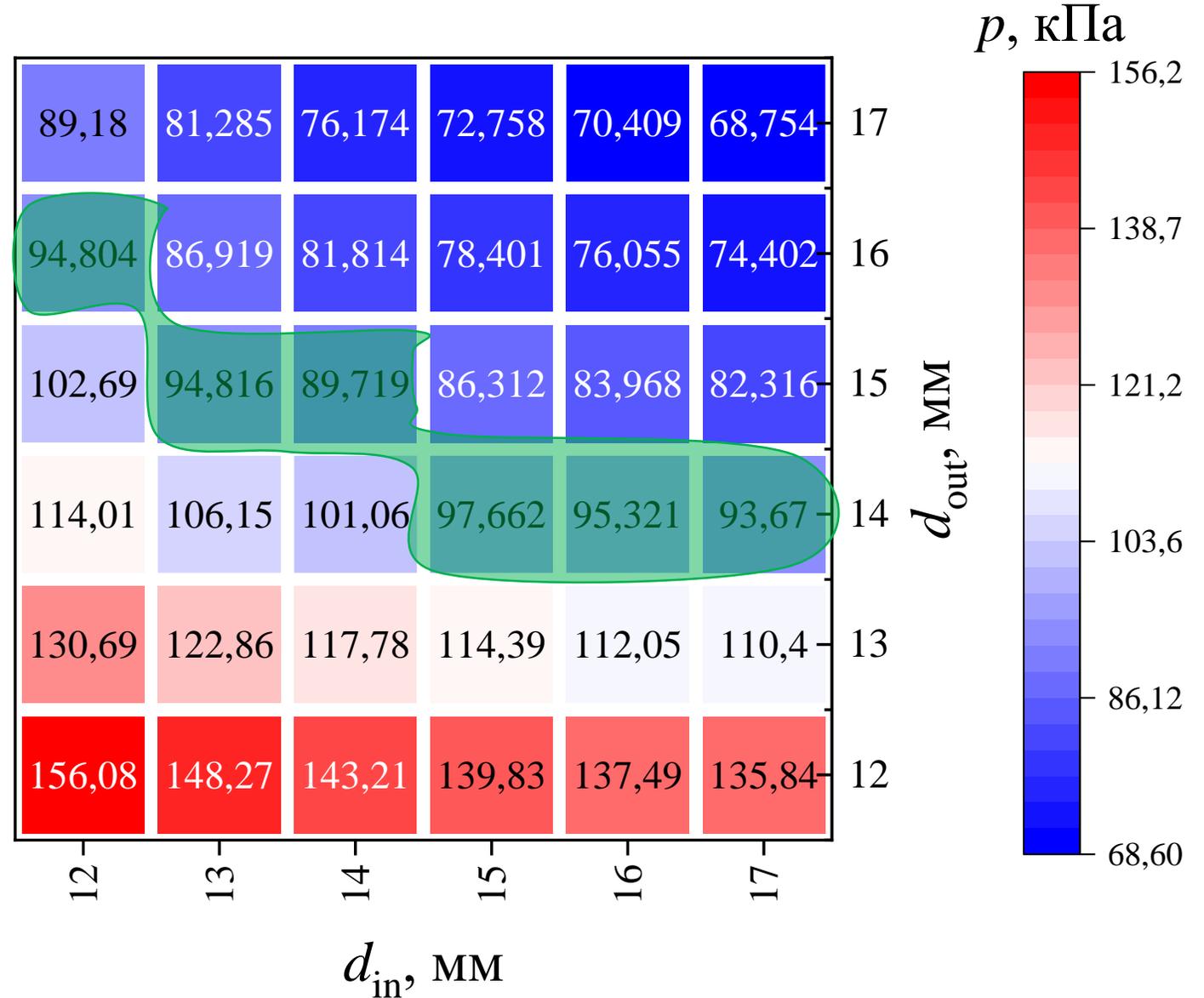
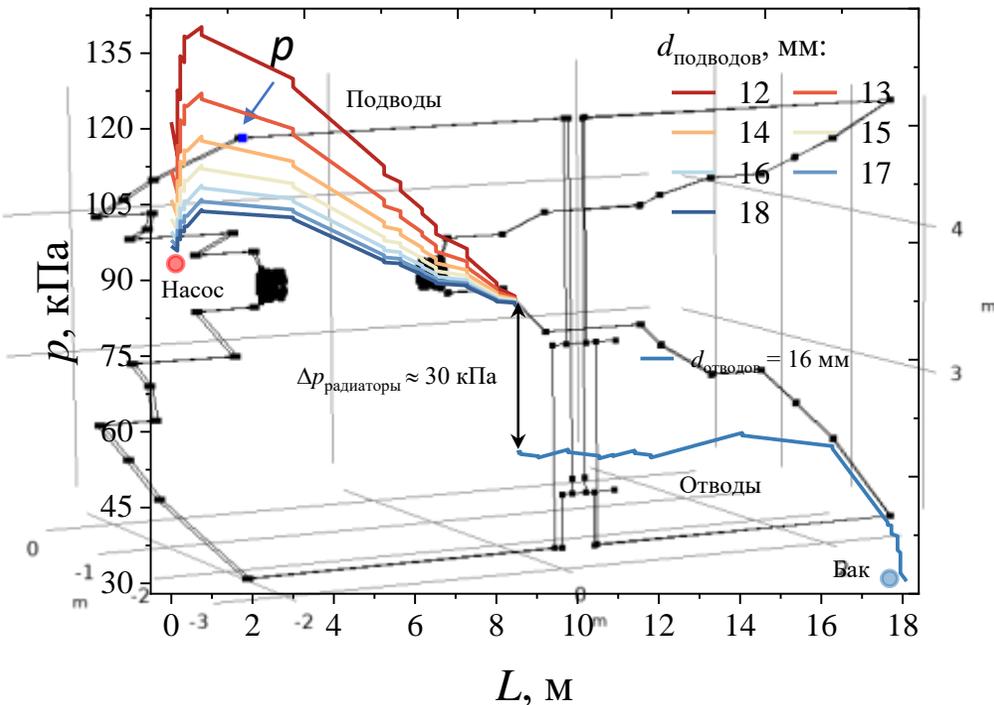
- Внутренний диаметр труб:
 - Подводы/отводы 12 мм ;
 - коллектор - $10,0 \text{ мм}$;
 - манифольд - $5,0 \text{ мм}$;
 - переходник - $3,5 \text{ мм}$;
 - радиатор - $3,0 \text{ мм}$.

d_in=12 mm, d_out=12 mm Line: Pressure (bar) Max/Min Line: Pressure (bar)



Результаты. Распределение давления в системе

Комбинируя диаметры подводящих и отводящих труб, можно регулировать абсолютные значения давления в системе для достижения режима *leakless*

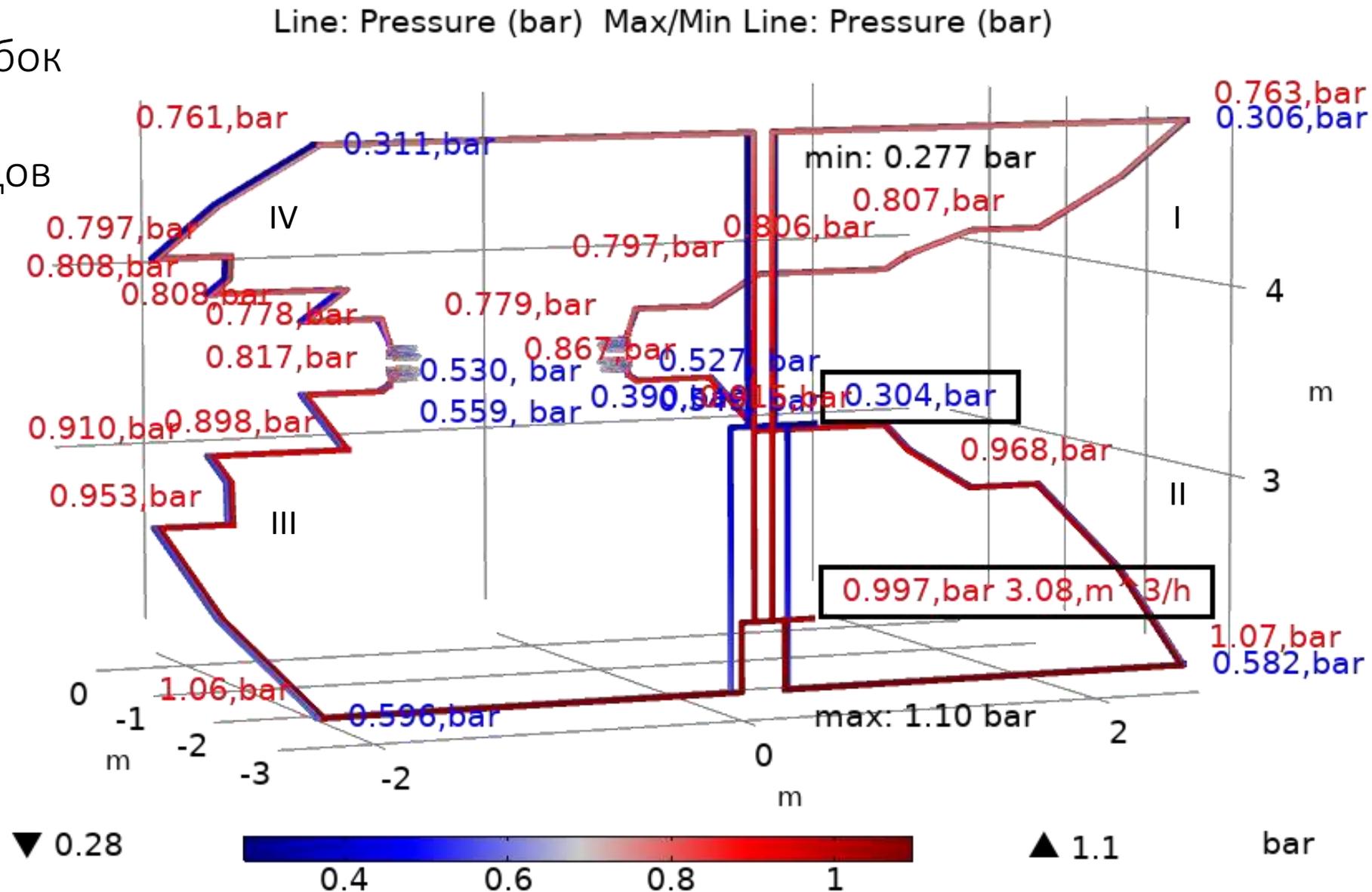


Результаты. Распределение давления в системе

При среднем расходе $0,07 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметре трубок радиаторов $3,0 \text{ мм}$ и диаметре трубок подводов и отводов $16,0 \text{ мм}$ *leakless* сохраняется

• Внутренний диаметр труб:

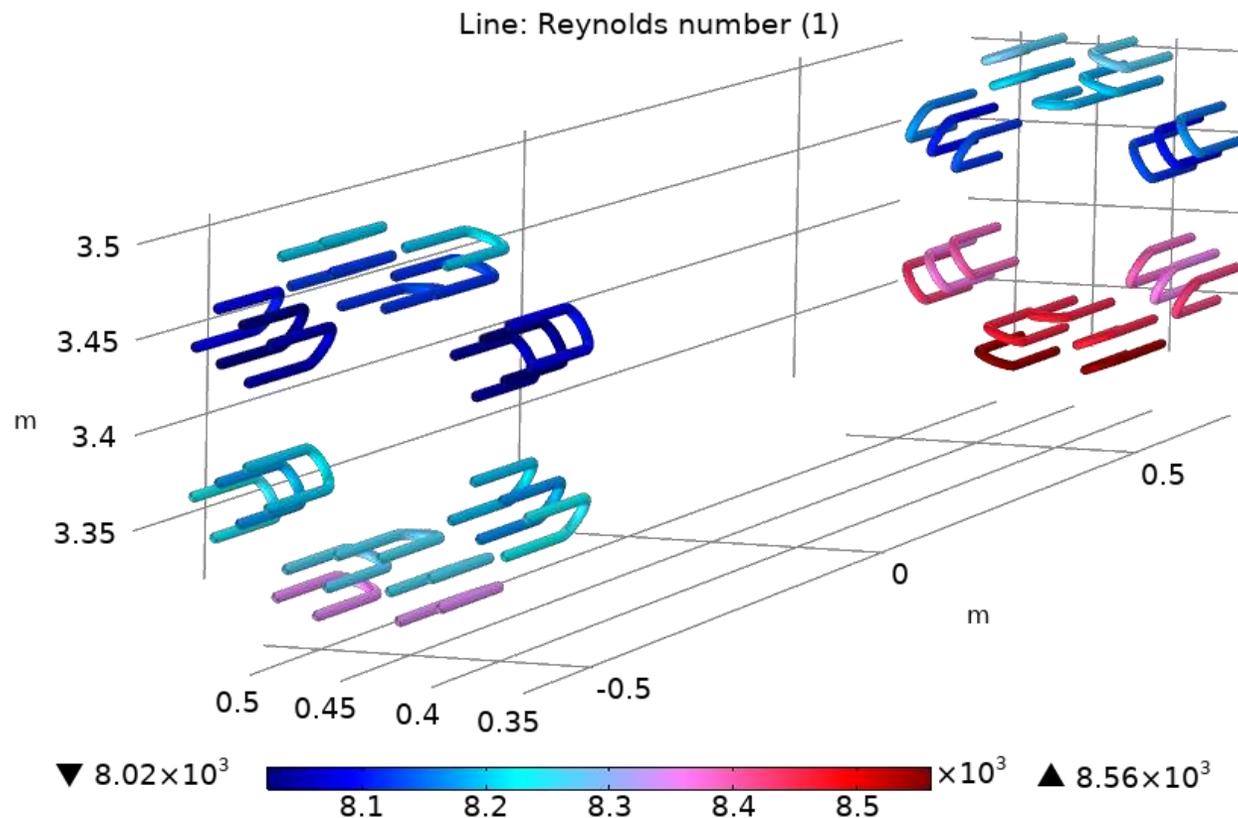
- Подводы/отводы 16 мм ;
- коллектор - $10,0 \text{ мм}$;
- манифольд - $5,0 \text{ мм}$;
- переходник - $3,5 \text{ мм}$;
- радиатор - $3,0 \text{ мм}$.



Средний расход на радиаторы $0,068-0,071 \text{ м}^3/\text{ч}$
Число Рейнольдса $8,5 \cdot 10^3$

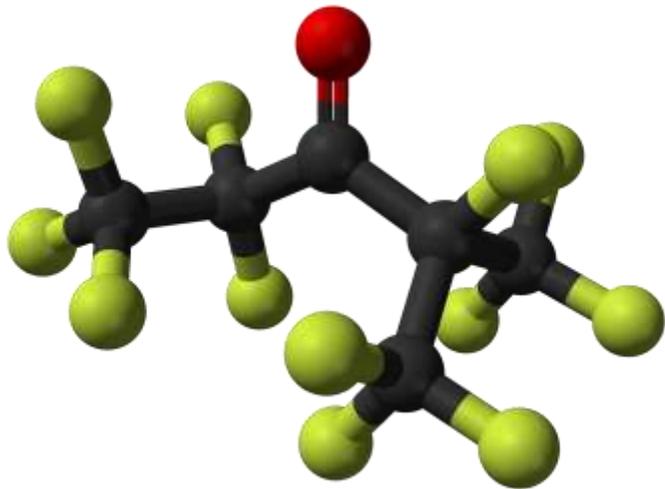
Таблица. Общий расход на контуры
и средний на радиаторы

контур	Общий расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Средний расход на радиатор, $\text{м}^3/\text{ч}$
I	0,76	0,069
II	0,78	0,071
III	0,77	0,070
IV	0,75	0,068



Дальнейшие работы

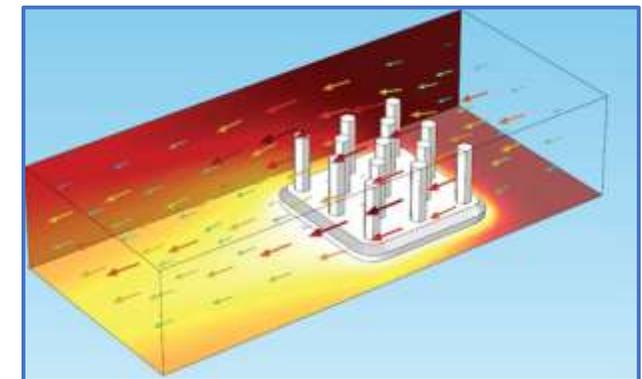
Предлагается в качестве альтернативного хладоносителя использовать «сухую воду» Noves 1230 фторкетон ФК-5-1-12, хладон ПФК-49 $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$



Свойство	Значение
Теплоёмкость	1,103 кДж/кг°C
Теплопроводность	0.059 Вт/(м·К)
Плотность	1,610 кг/м ³

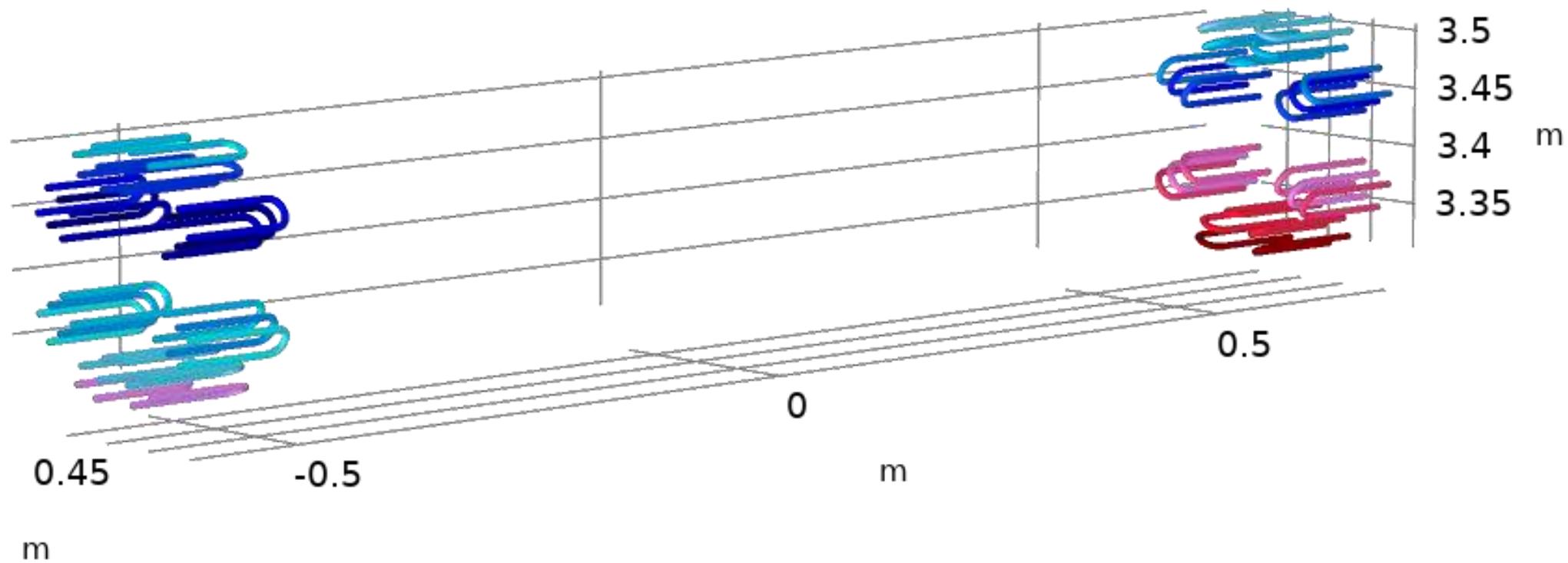
Необходимо:

- (1) радиационная стойкость Noves 1230
- (2) эксперимент с омыванием электроники



- На систему из 4-х контуров **общий** расход составил $3,08 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- внутренний диаметр трубок радиаторов 3,0 мм позволяет реализовать **турбулентный** режим течения воды ($Re \approx 8,5 \cdot 10^3$) при расходе на радиатор $0,07 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- Диаметр подводящих и отводящих труб позволяет реализовать циркуляцию хладоносителя в режиме *leakless*.
- Предлагается использовать альтернативный хладоноситель: **Novac 1230**.

Line: Reynolds number (m/s)



▼ 2.68



▲ 2.86

m/s