



Погребисский М.Я., Шагеев Э.Р.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО УСКОРЕННОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В ВАКУУМНЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Теплоизоляция  
высокотемпературных  
вакуумных печей

Футеровка

Низкоплотные  
углерод-углеродные  
композиционные  
материалы

✓ низкая  
теплопроводность

Экранная  
теплоизоляция

Металлические экраны  
с высокими отражающими  
свойствами

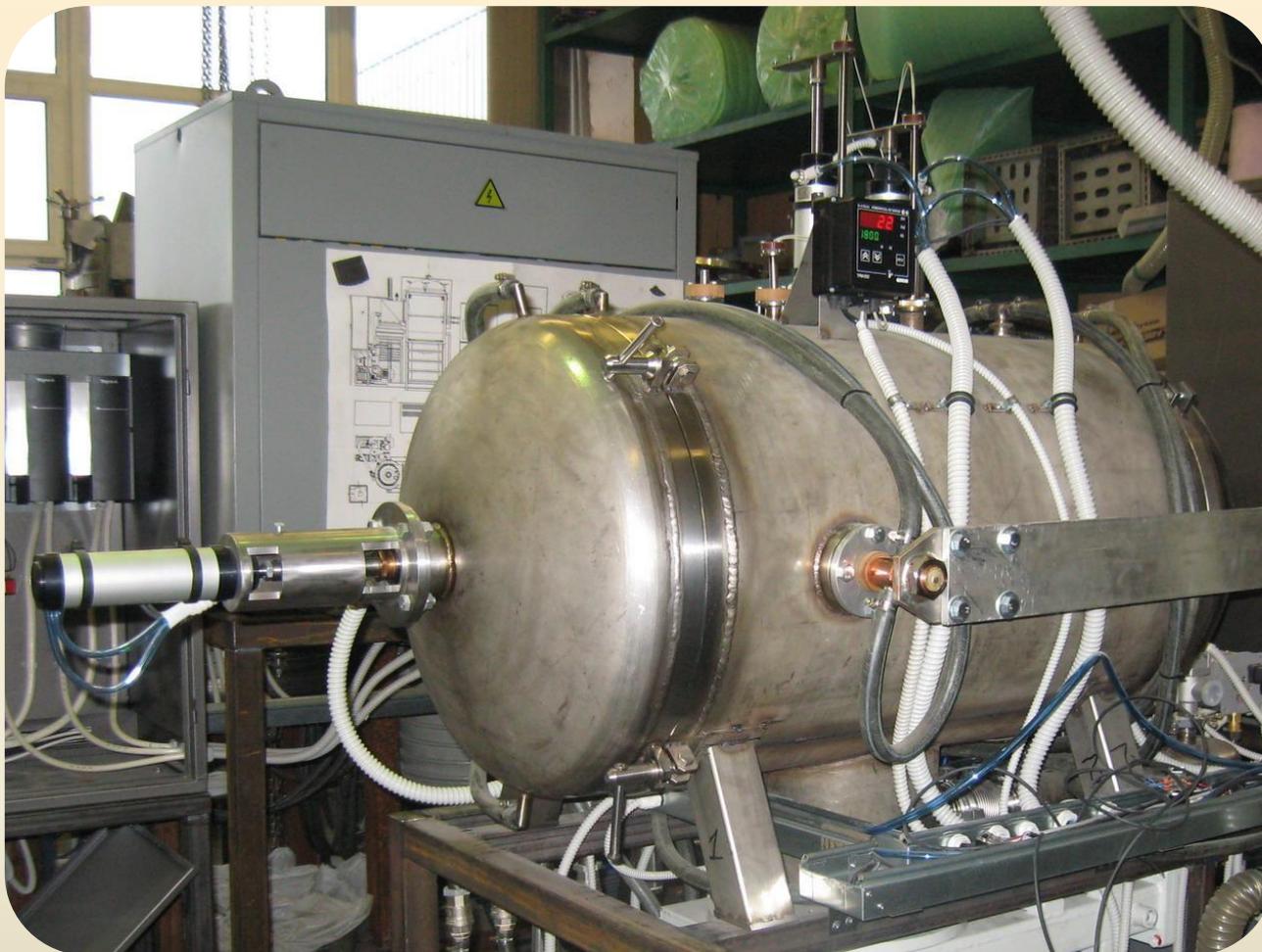
✓ низкое значение  
степени черноты

Определяющие  
свойства:

# Свойства НПУУКМ



- Открытая пористость от 60 до 80%;
- плотность в пределах  $230 \pm 20 \text{ кг/м}^3$ ;
- теплопроводность  $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .



## **Печь ВС-16-18-У**

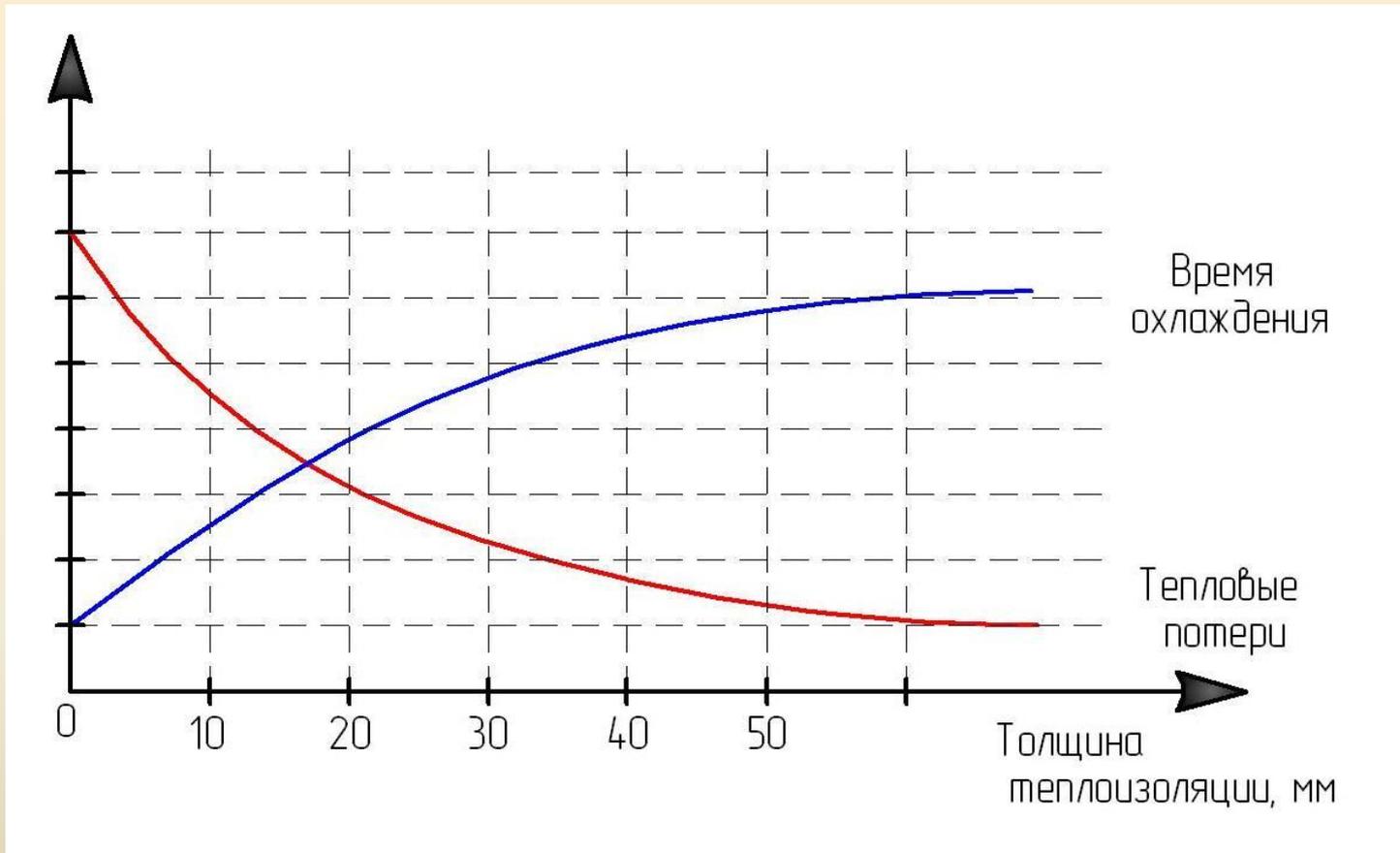
Печь предназначена для спекания пористых фильтрующих элементов



## **Рабочая камера**

□ Размеры рабочего пространства: 200x400x200 мм

# Техническое противоречие



**Рис.4** Зависимость показателей технологического процесса от толщины теплоизоляции

## Способы охлаждения

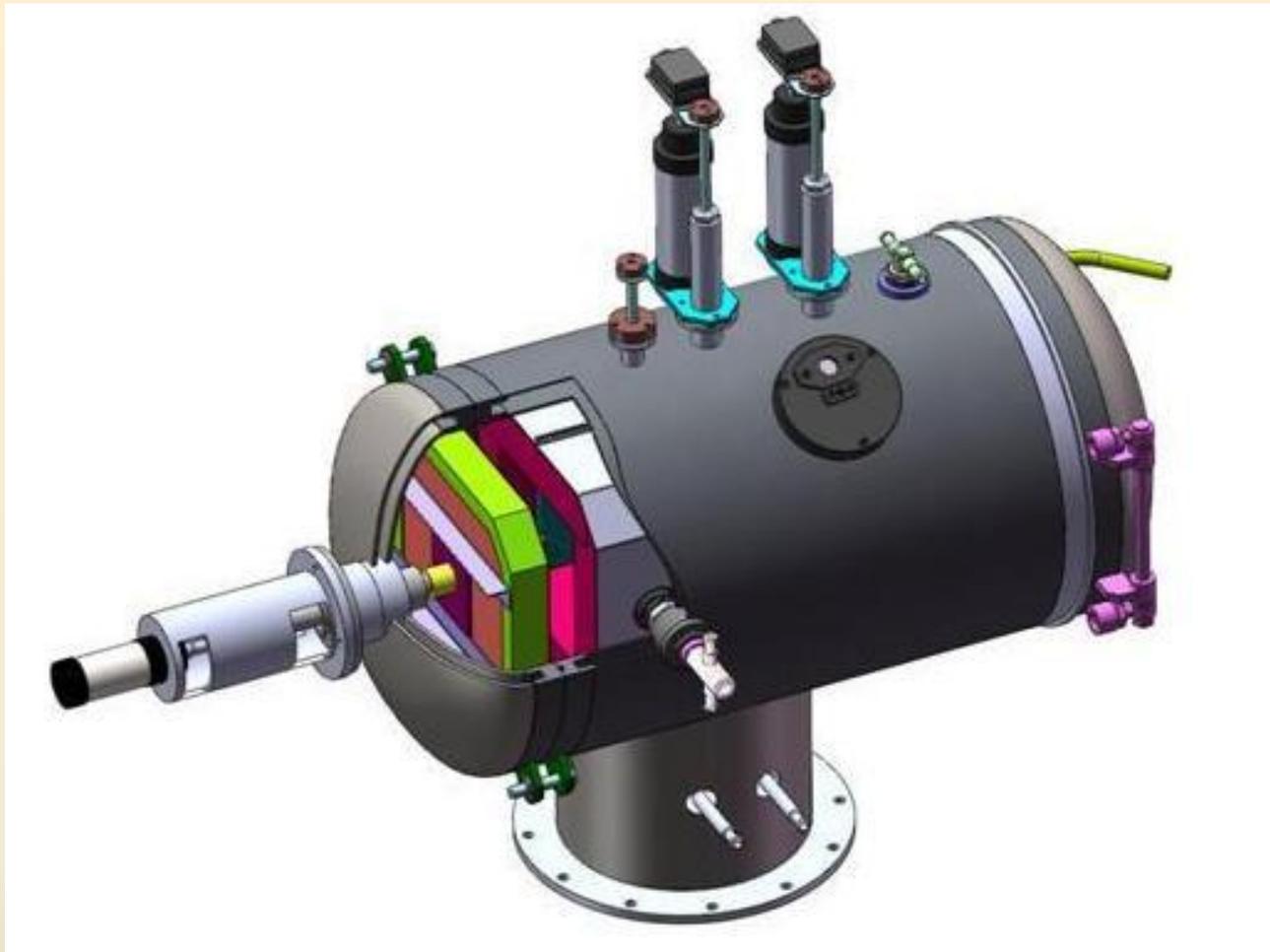
```
graph TD; A[Способы охлаждения] --> B[Охлаждение в жидких средах]; A --> C[Охлаждение в вакууме и/или инертном газе];
```

### Охлаждение в жидких средах

- крайне ограниченная возможность влияния на скорость охлаждения
- возникновение деформаций при высоких скоростях охлаждения
- применимо не во всех технологических процессах

### Охлаждение в вакууме и/или инертном газе

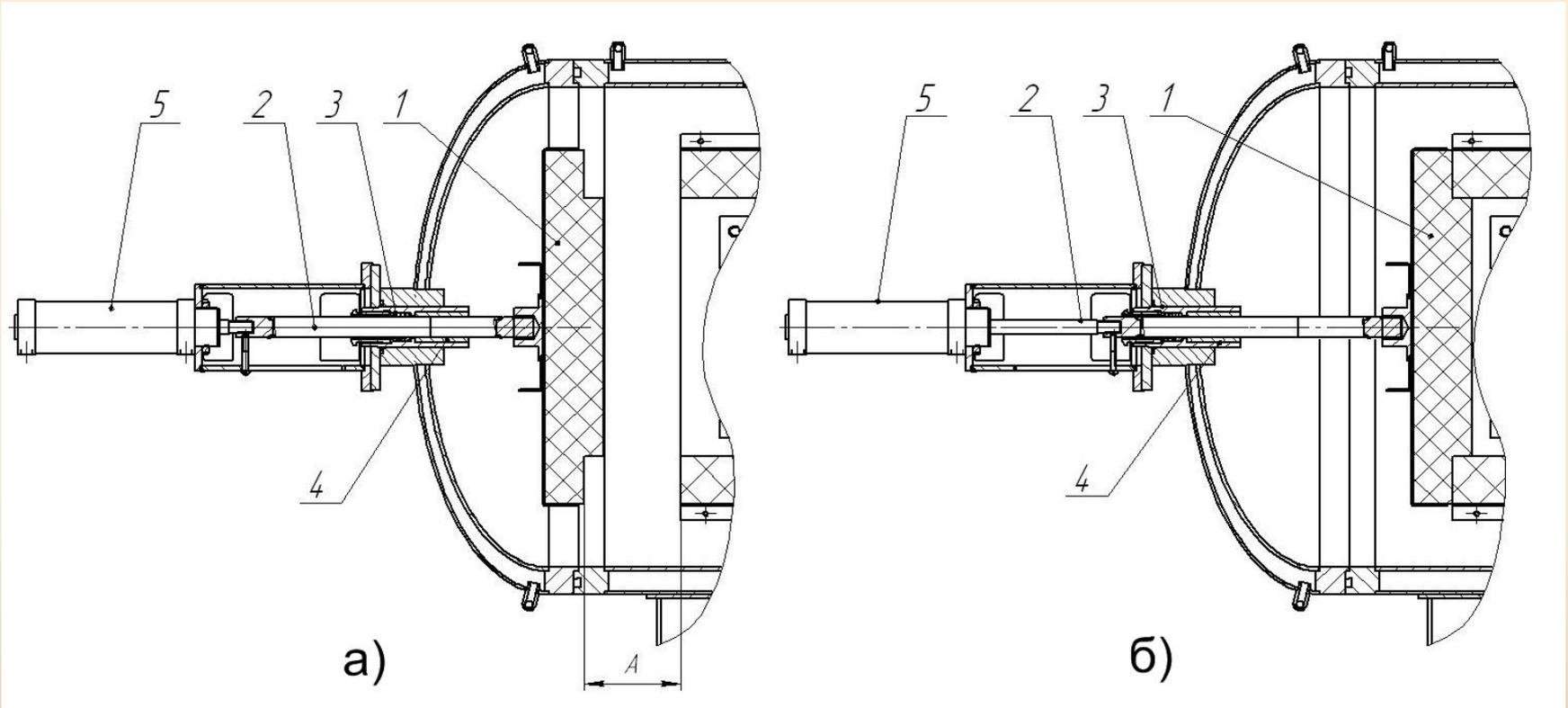
- неравномерность температурного поля
- при охлаждении газом возможно появление «застойных» зон



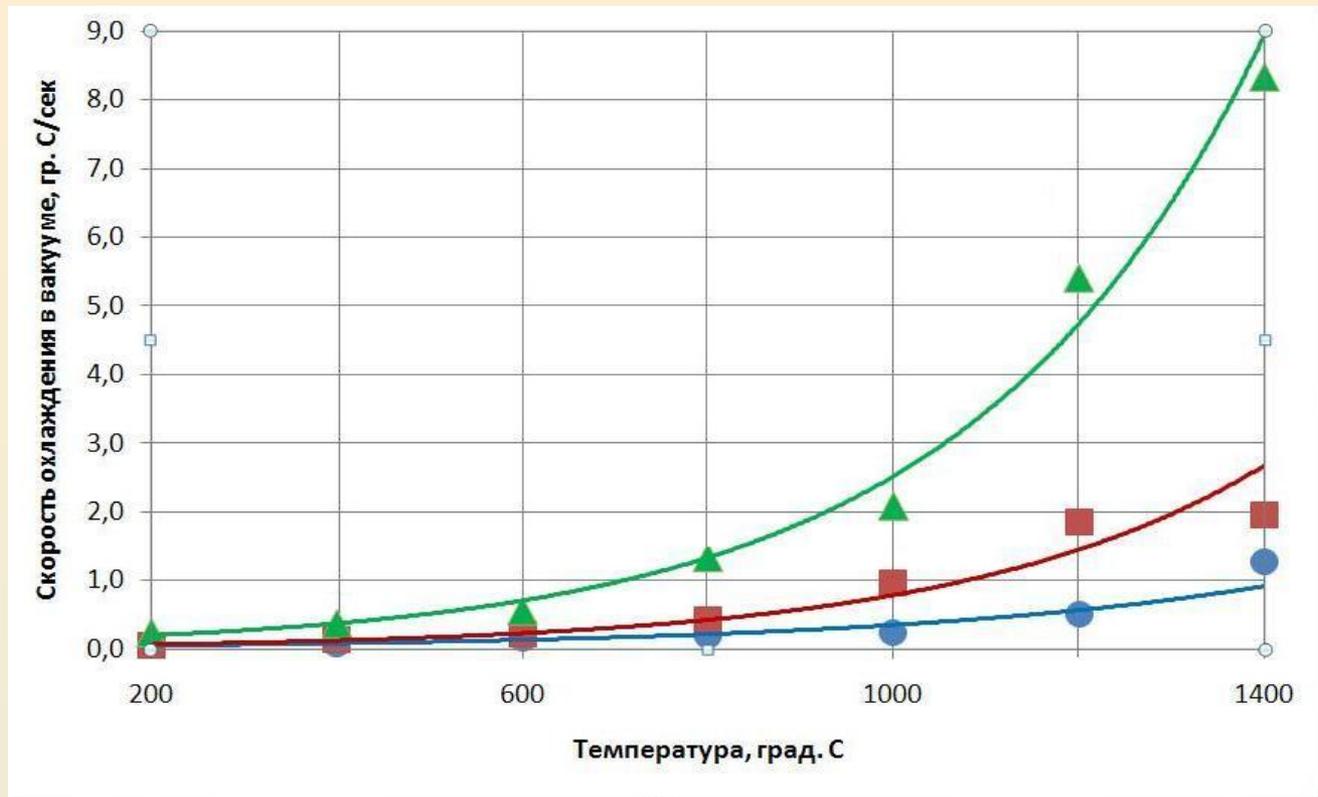
## **Разрешение технического противоречия:**

Подвижная торцевая стенка теплоизоляции позволяет значительно увеличить скорость охлаждения загрузки

# Механизм отведения торцевой теплоизоляции



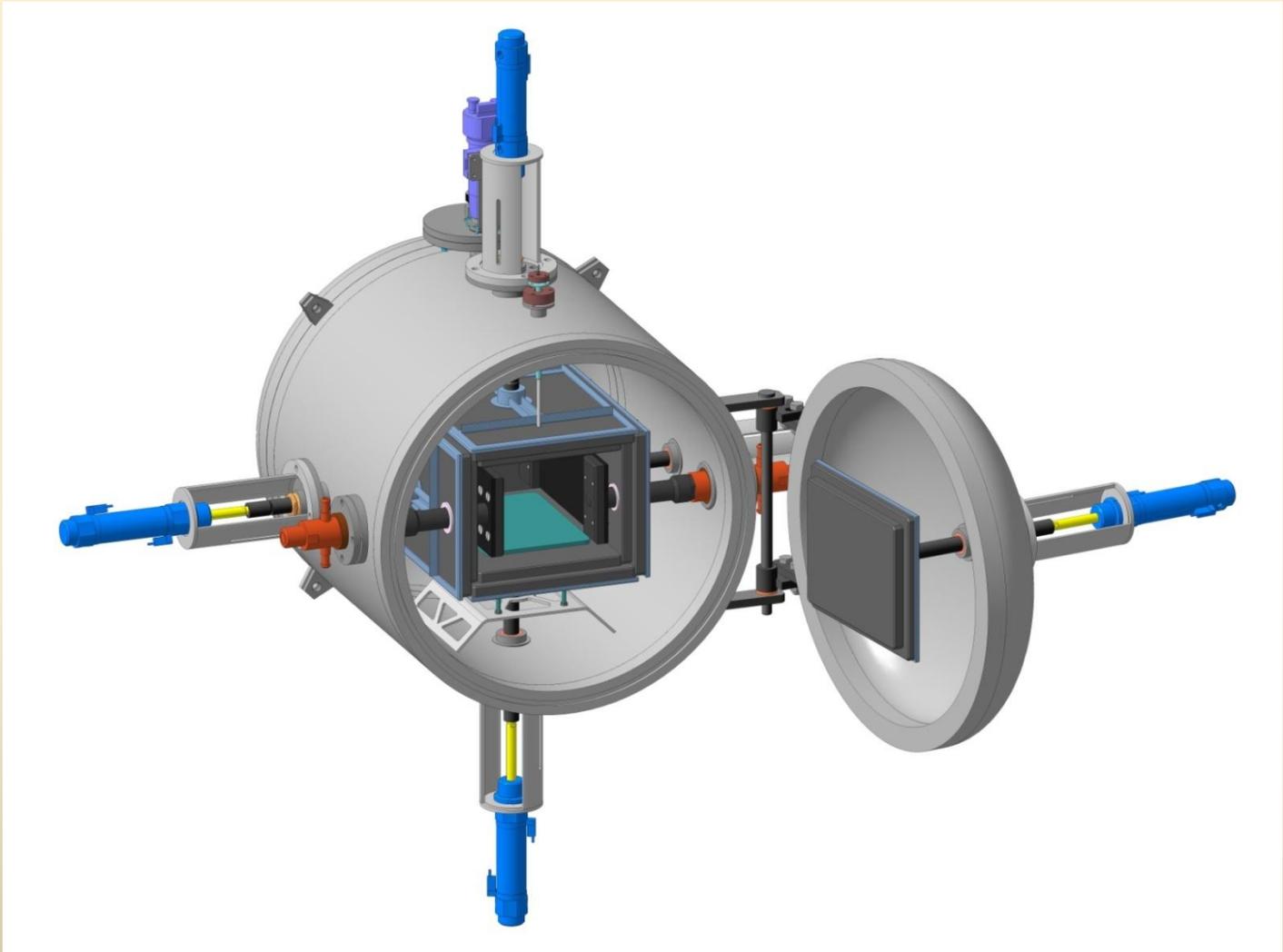
а) положение при охлаждении; б) положение при нагреве

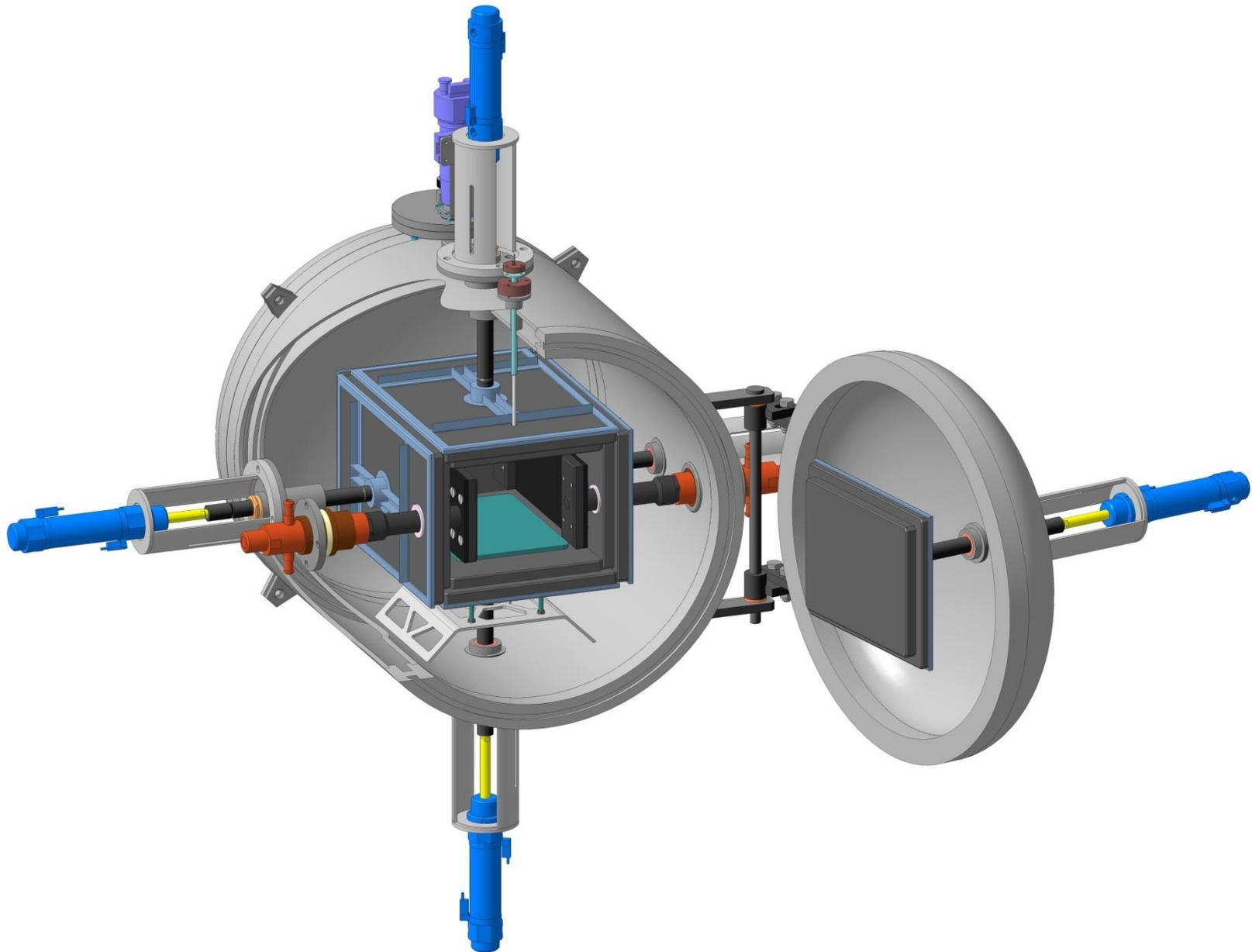


**Изменение скорости охлаждения камерной печи объемом рабочего пространства 16 дм<sup>3</sup> в зависимости от температуры:**

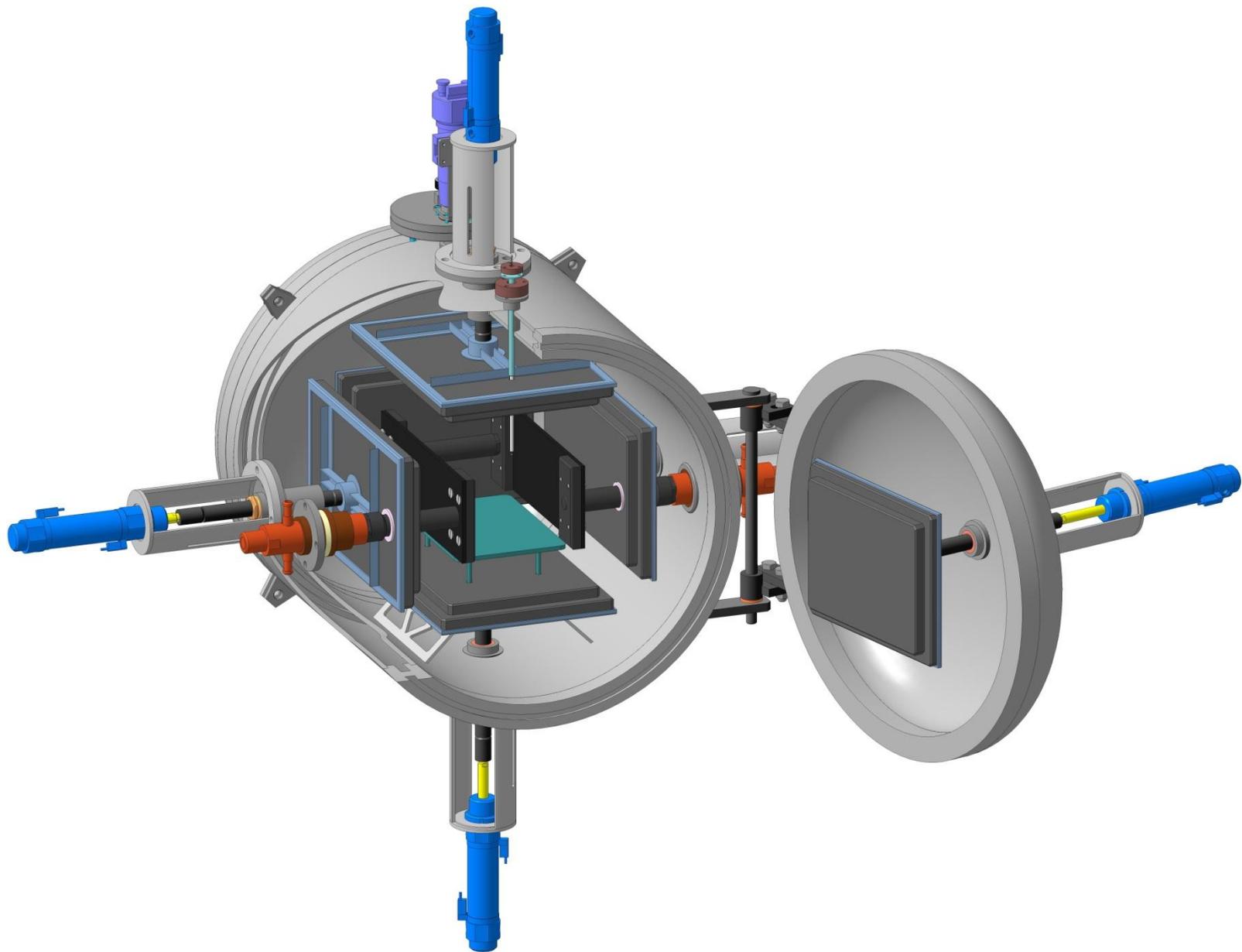
● - футеровка из низкоплотного (0,3-0,4 г/см<sup>3</sup>) УУКМ; ■ -экранная теплоизоляция (Мо, сталь 12Х18Н10Т); ▲ – футеровка из низкоплотного (0,3-0,4 г/см<sup>3</sup>) УУКМ с подвижной торцевой теплоизоляцией. Охлаждение в вакууме 10<sup>-2</sup> Па.

# Предлагаемая конструкция теплоизоляции



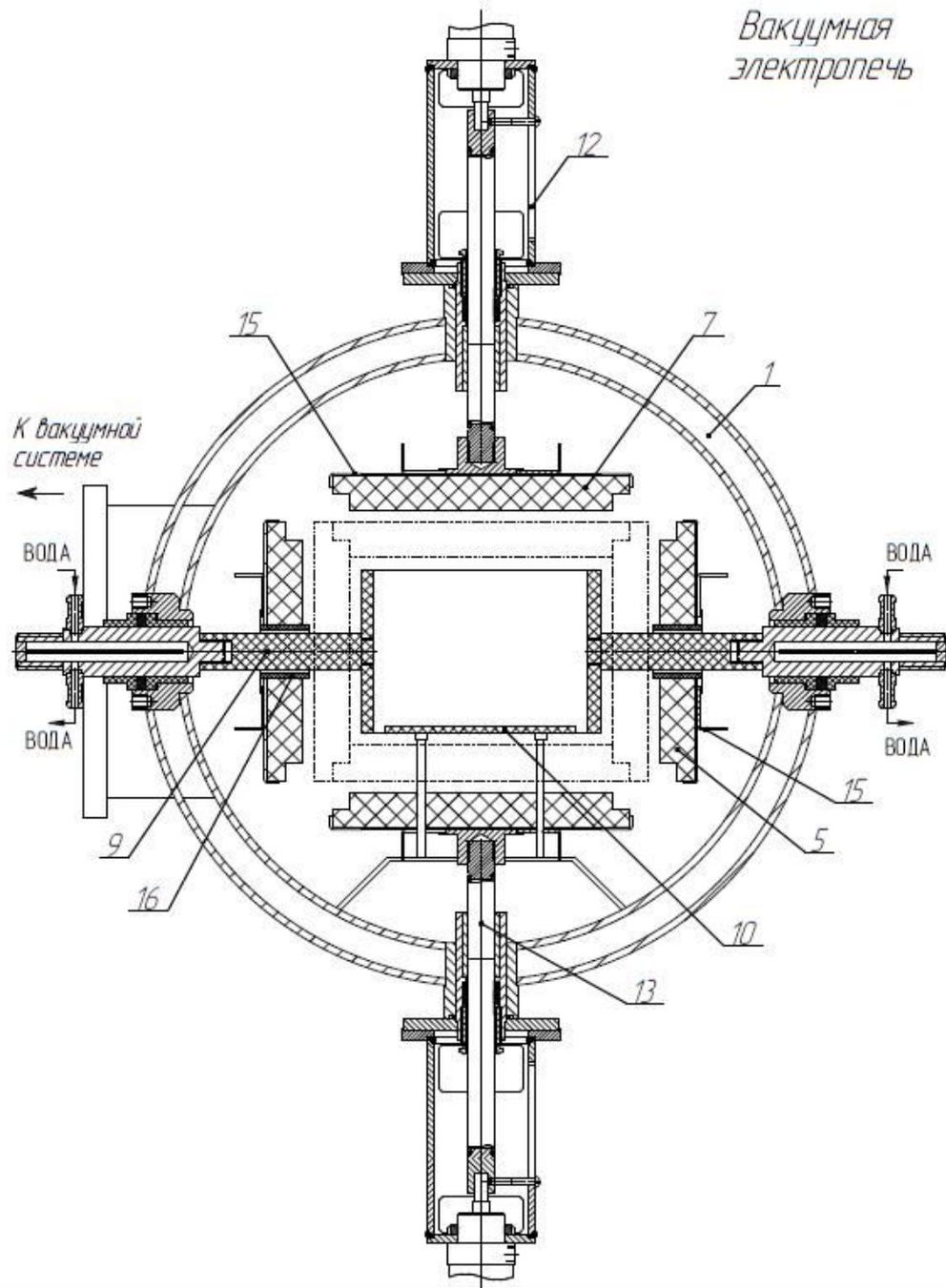


нагрева)

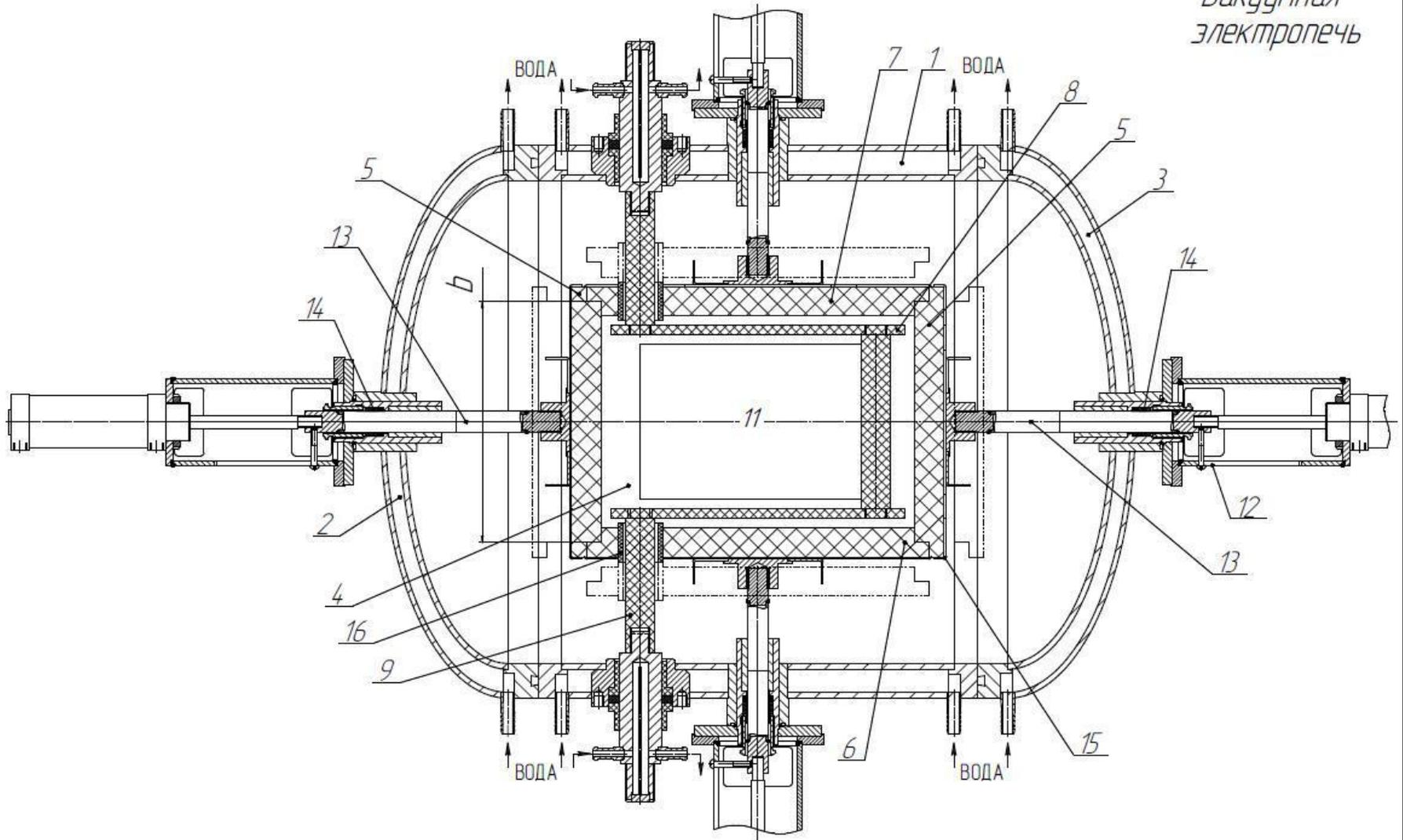


**Стенки теплоизоляции раздвинуты (стадия охлаждения)**

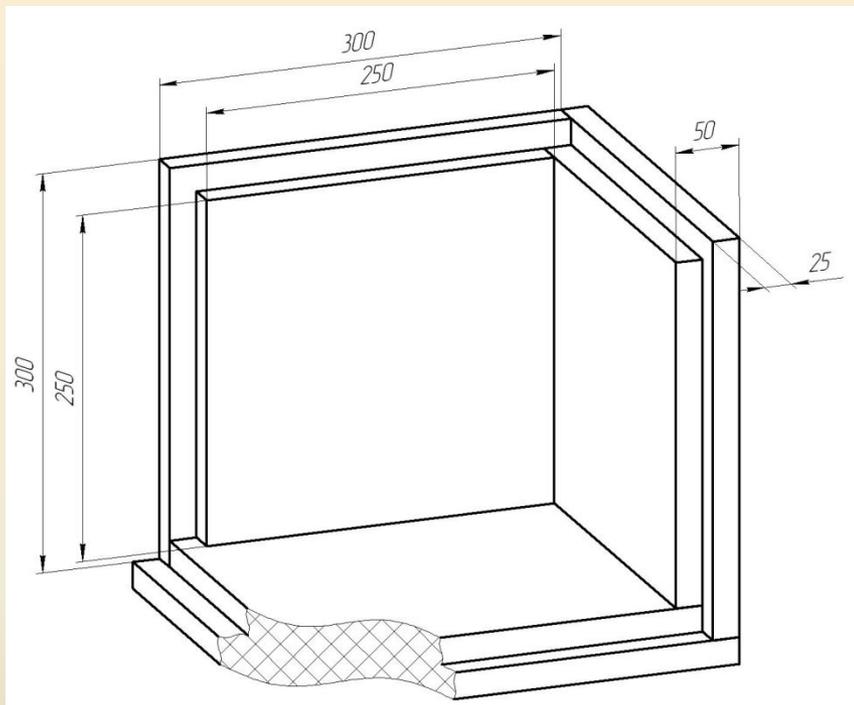
Вакуумная  
электропечь



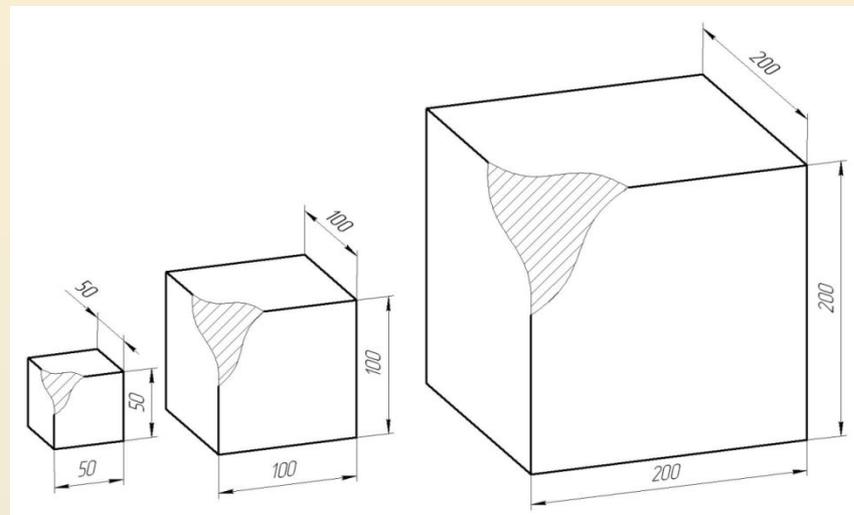
Вакуумная  
электропечь



# Моделирование температурного поля



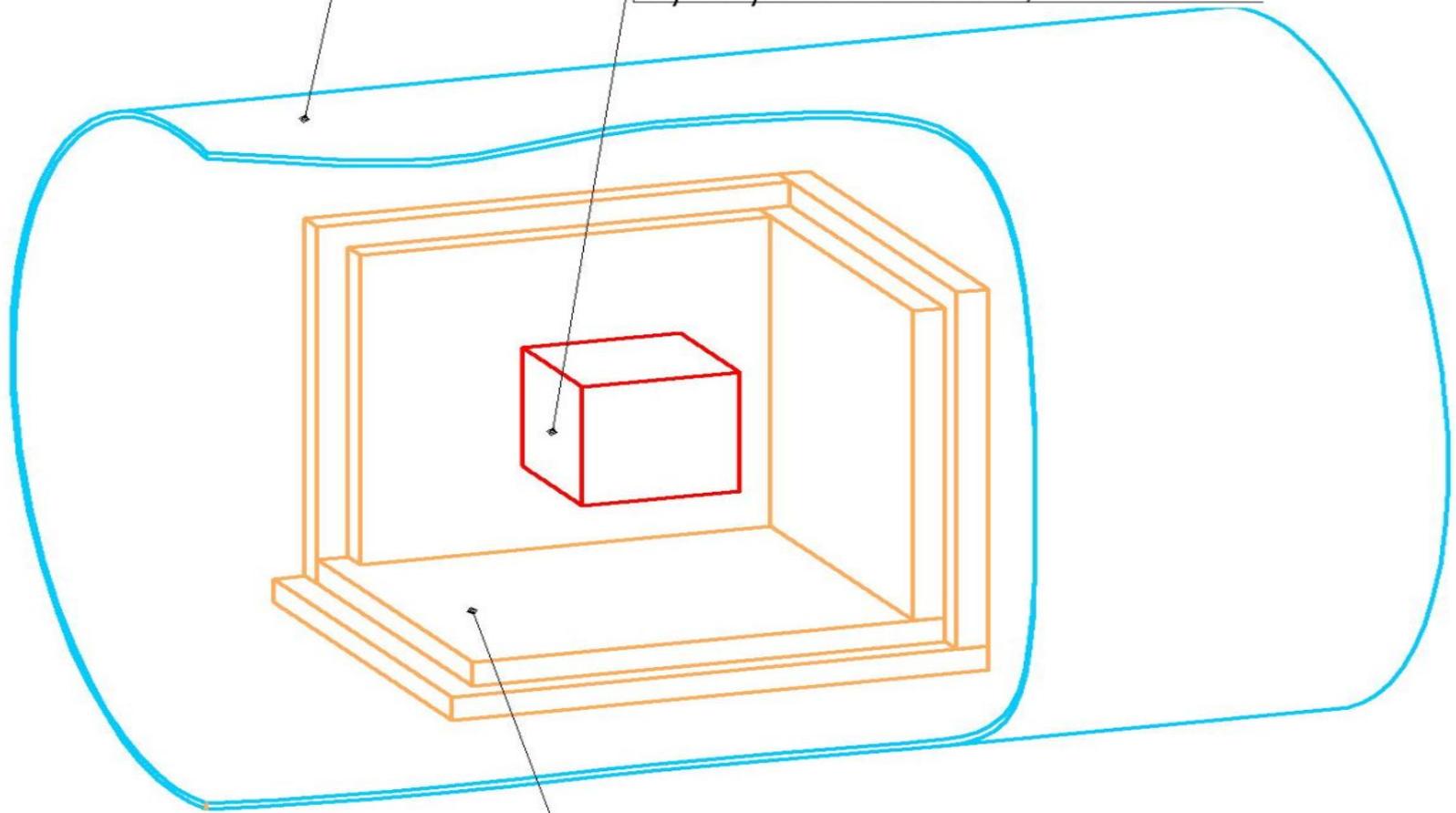
Пространственная модель блока теплоизоляции и нагревателей



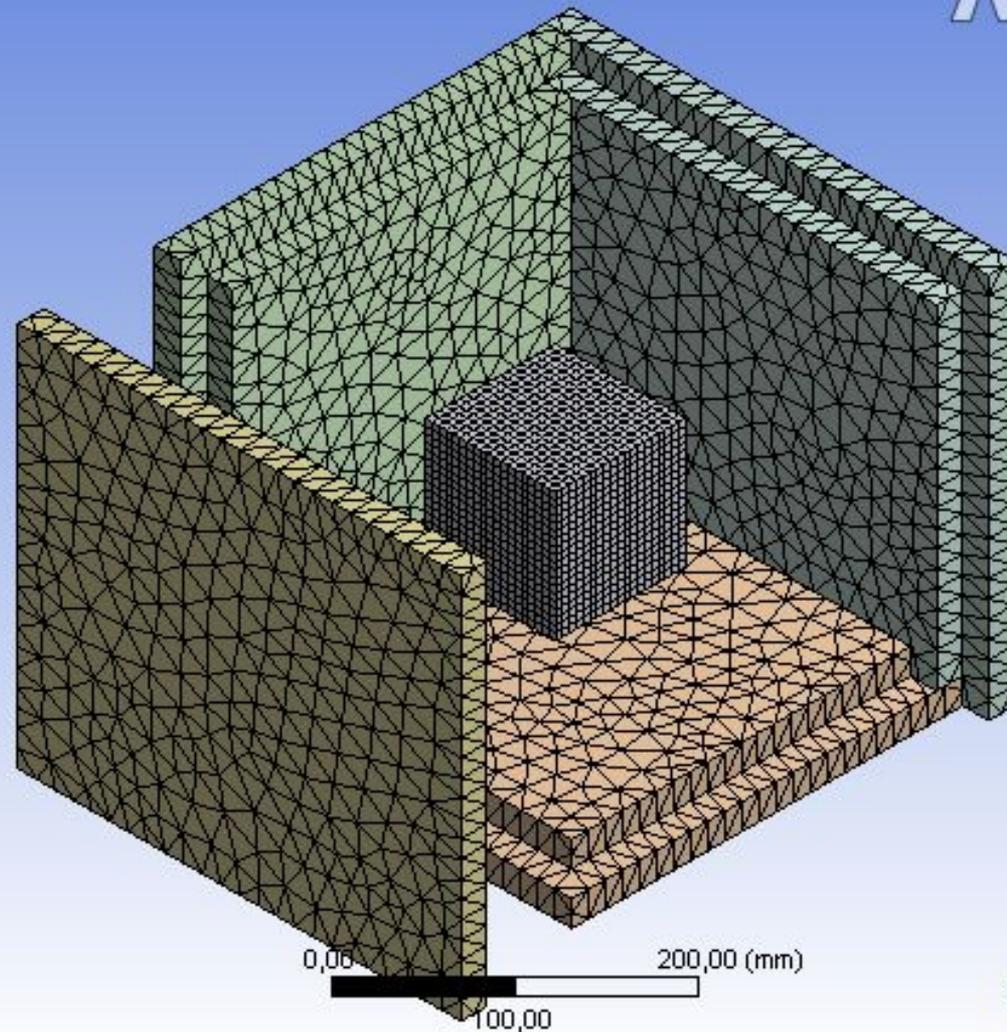
Пространственная модель садки

Водоохлаждаемый корпус  
(окружающая среда) 20 °C

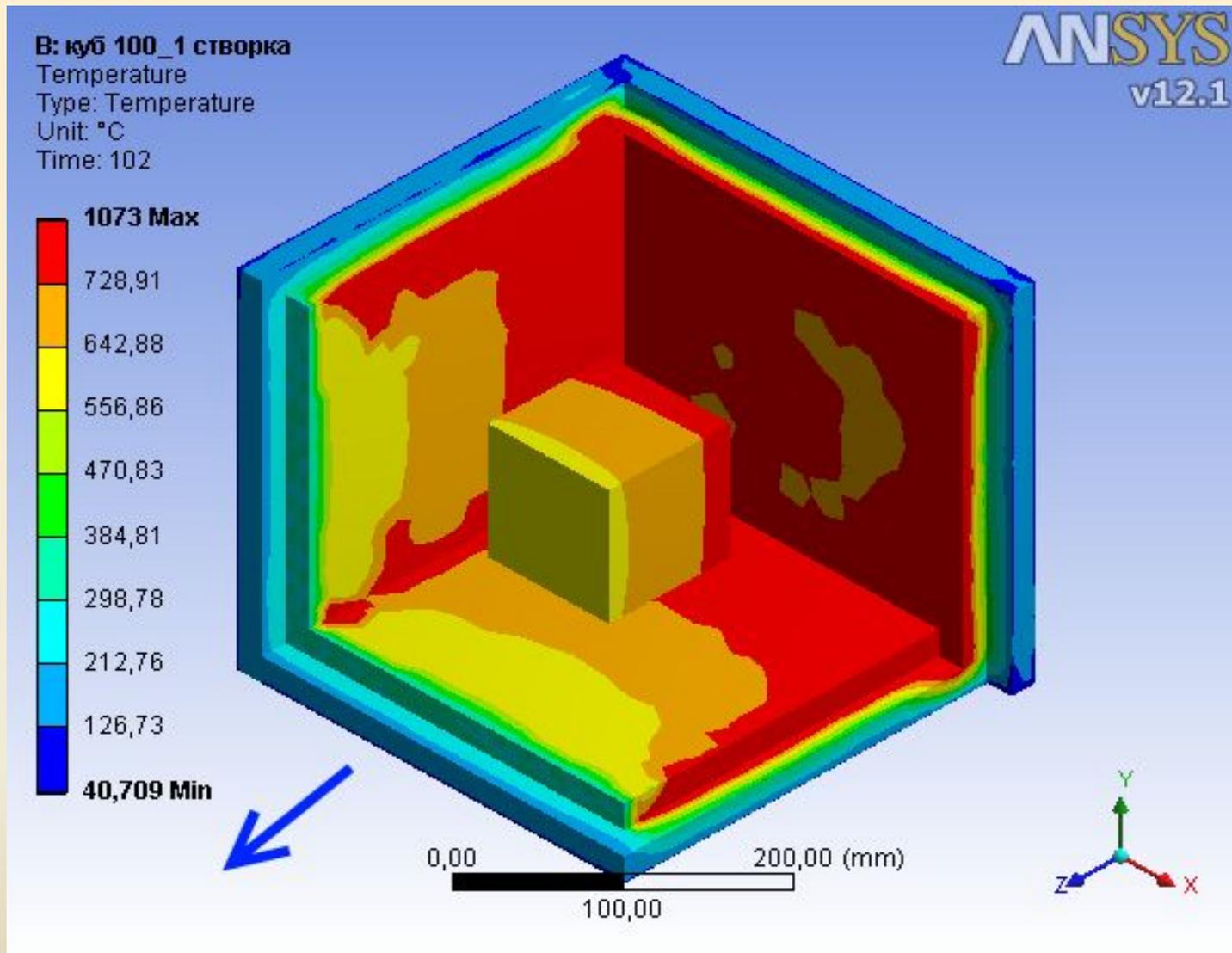
Садка  
прогретое тело, 1200 °C



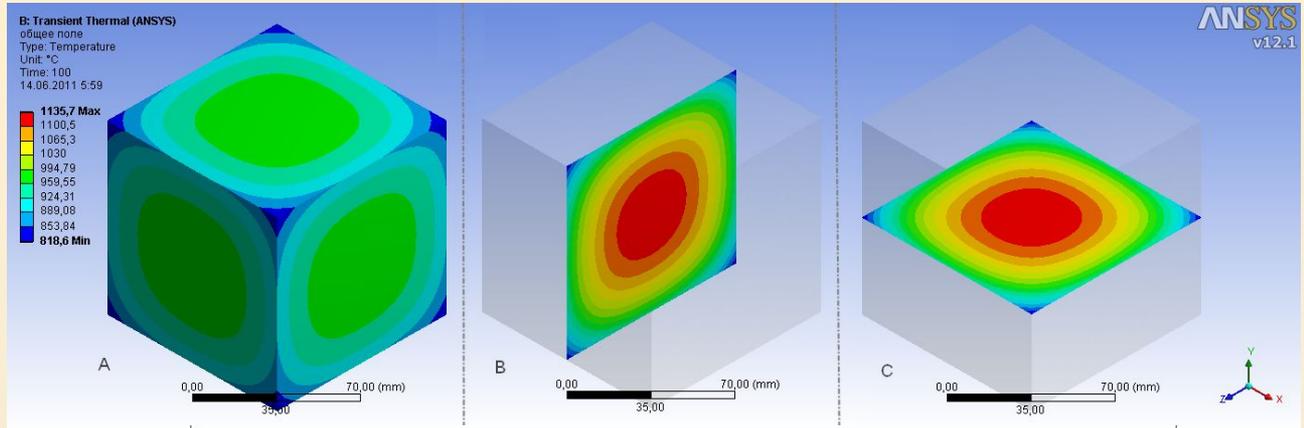
Теплоизоляционный блок  
НПУЧКМ, на поверхности 1200 °C



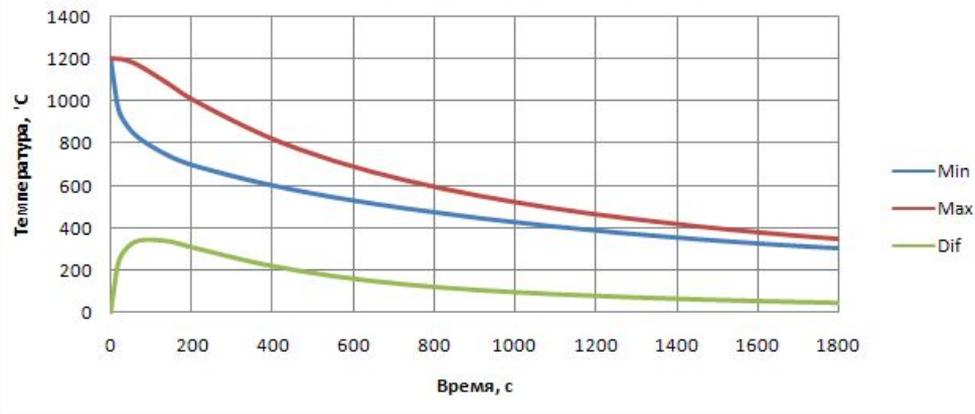
Конечно-элементная сетка дискретизации



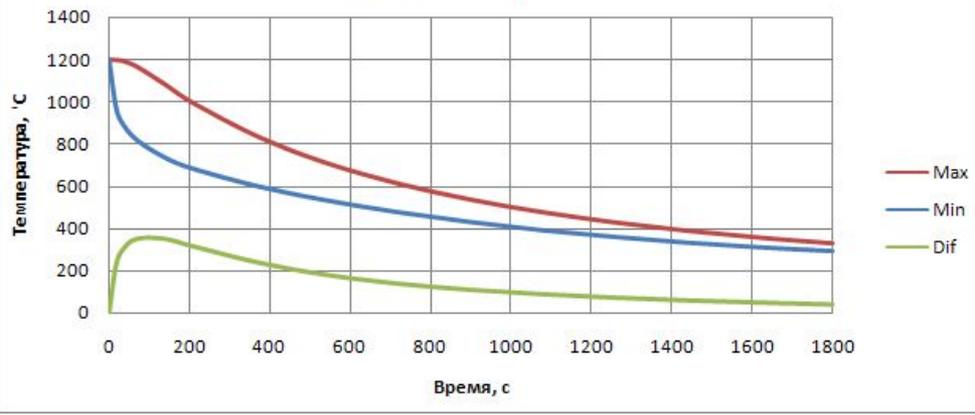
Температурное поле в момент наибольшего перепада температур по сечению садки

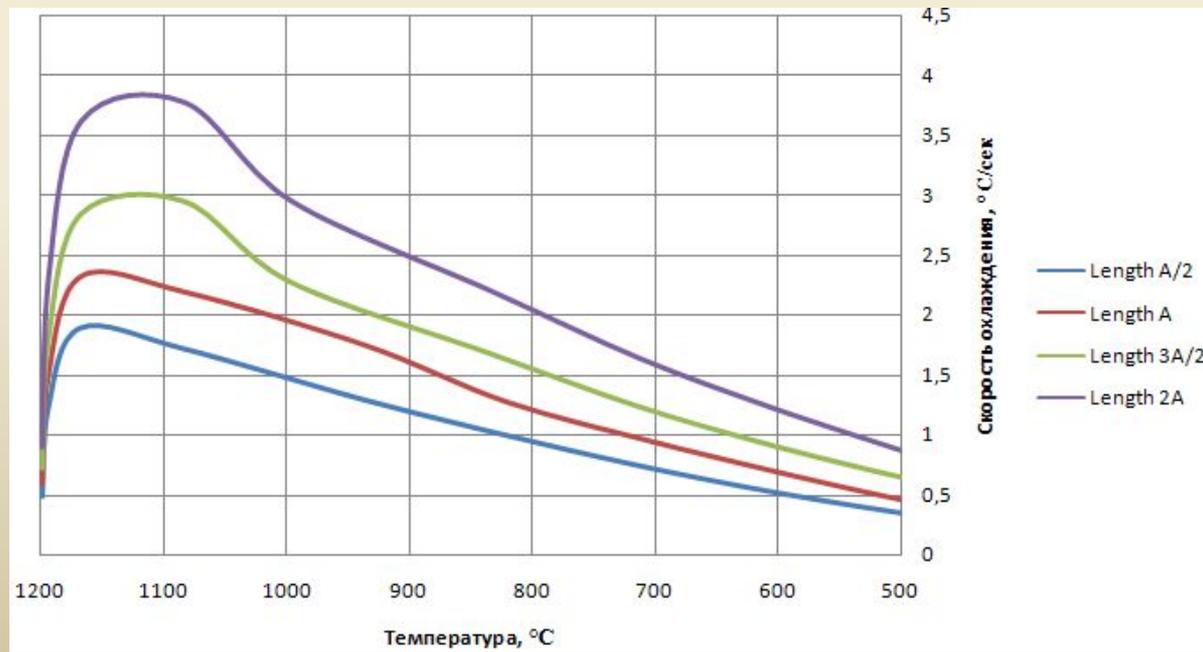
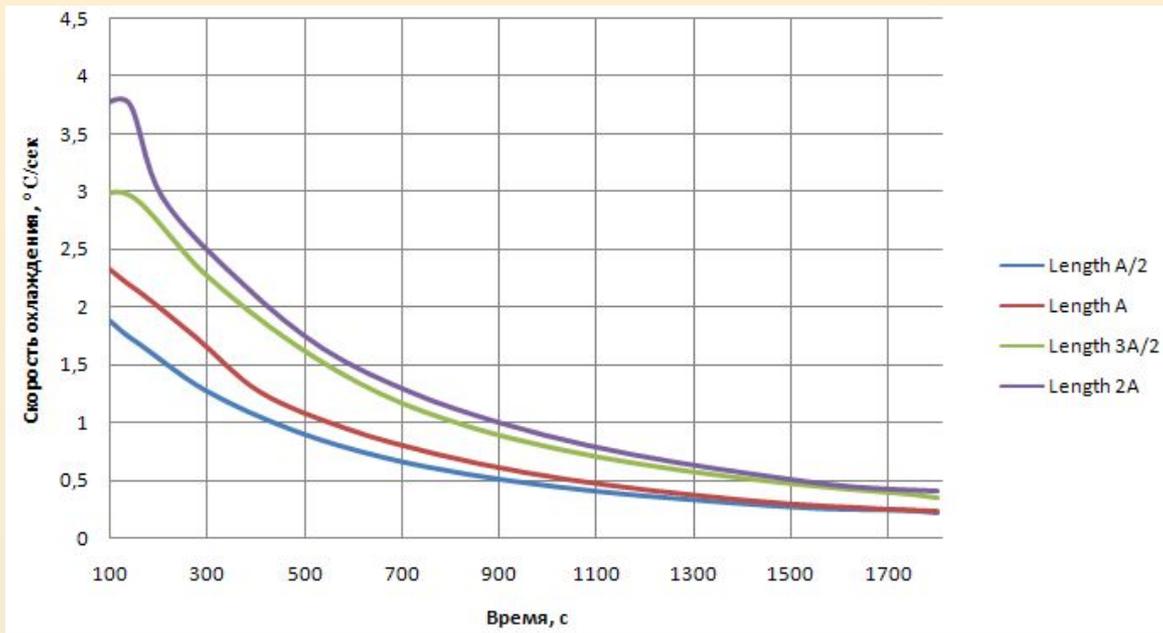


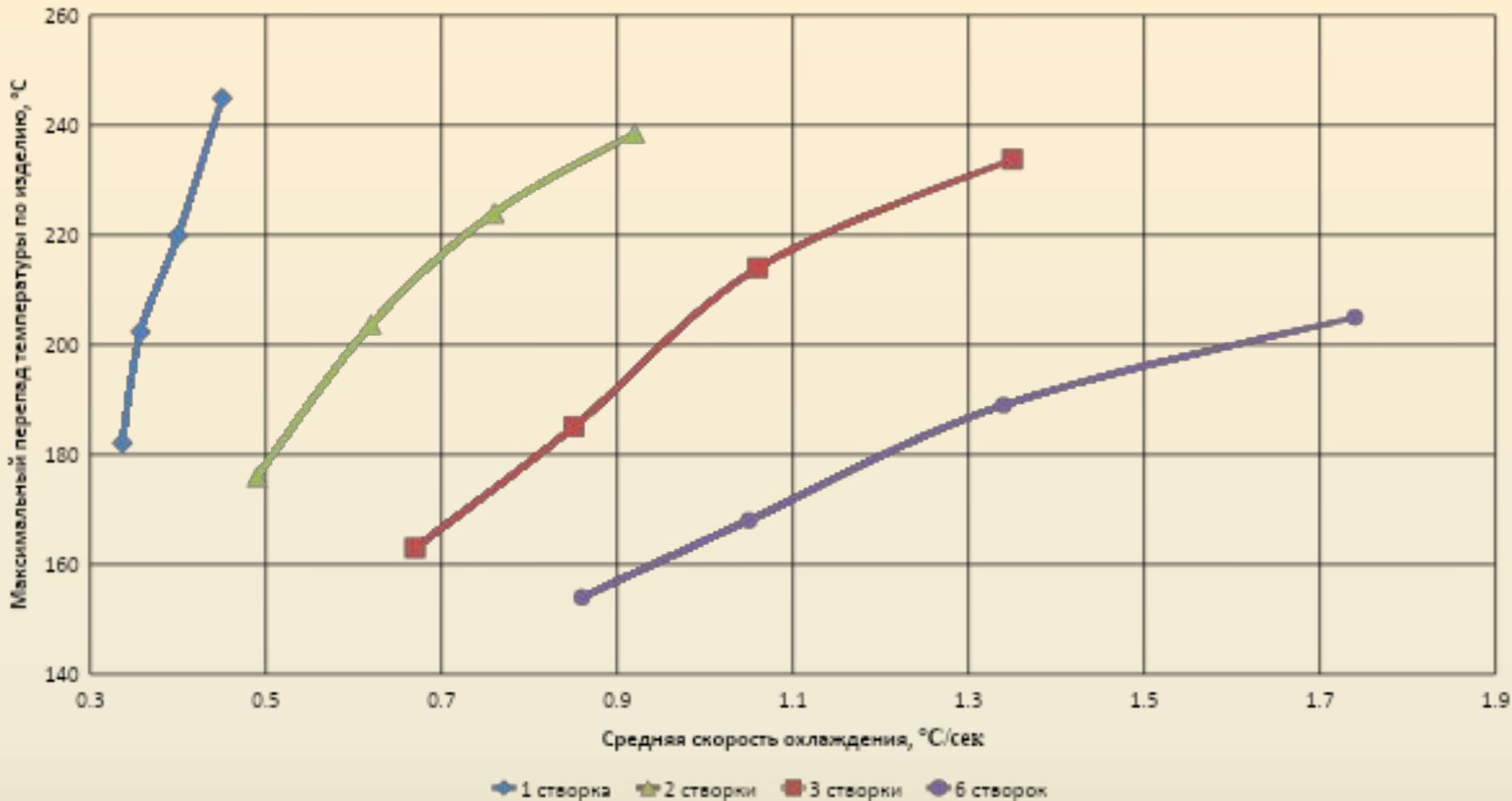
**6 створок, смещение на 3A/2**



**6 створок, смещение на 2A**



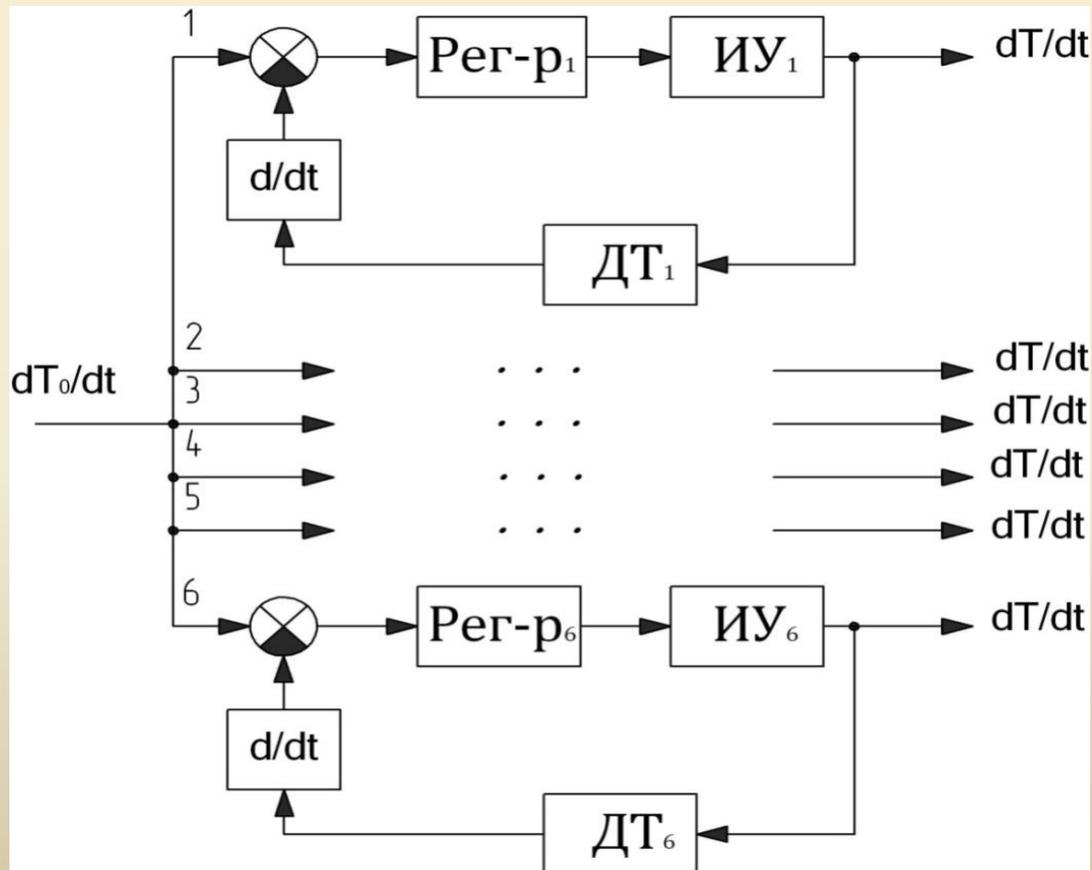




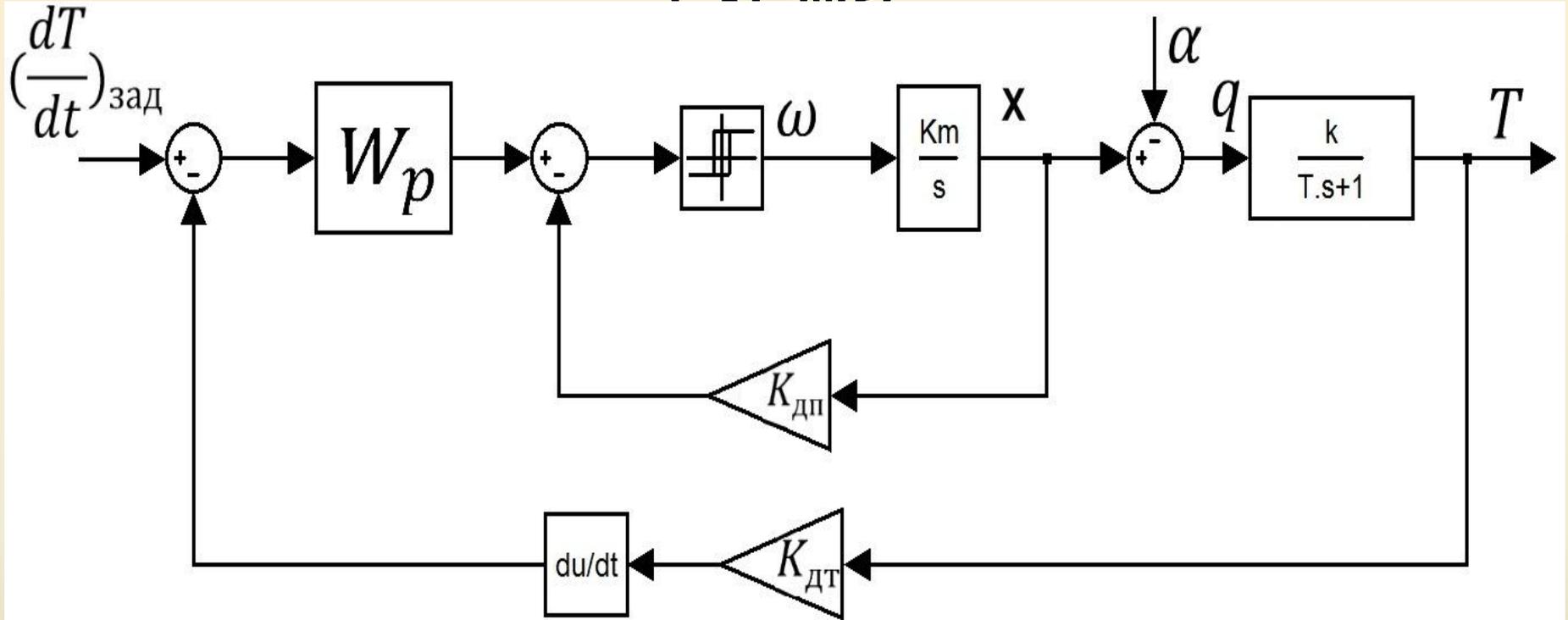
Зависимость перепада температур по сечению садки от скорости охлаждения

# Система управления

## Функциональная схема



# Структурная схема



**Спасибо за внимание!**