

# Решение задач двумерной стационарной теплопередачи в ELCUT

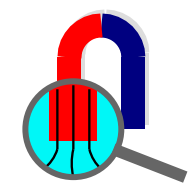


**Рехтер Александр Дантонович**

Директор ООО «Хайтек»

[Alex.Rekhter@haitek.ru](mailto:Alex.Rekhter@haitek.ru)

+7 902 331 0949



# Требования СП проверяемые в ELCUT

- Санитарно-гигиенические требования:

$$t_{\text{вп}} \geq t_{\text{тр}} + 2 \div 3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

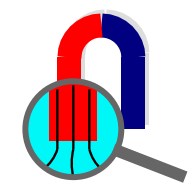
- Требования теплозащиты

$$R_{\text{пр}} \geq R_{\text{норм}} \left[ \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}} \right]$$

$R_{\text{пр}}$  невозможно определить одним кликом мыши в программе ELCUT, поскольку надо как правило рассмотреть несколько моделей, однако используя рассчитанное в ELCUT интегральное значение теплового потока  $\Phi$ , Вт можно получить удельные коэффициенты теплопотерь  $U_i$ ,  $\Psi_j$  и  $X_k$  в формуле расчета приведенного термического сопротивления

Методика подробно рассмотрена в вебинаре Дмитрия Крайнова

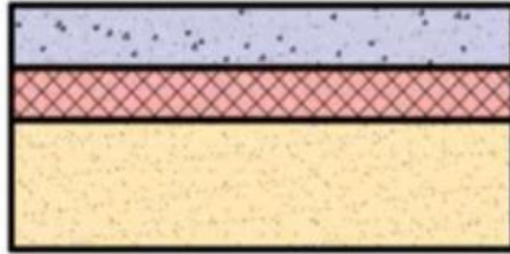
[https://elcut.ru/seminar/seminar\\_kraynov2.htm](https://elcut.ru/seminar/seminar_kraynov2.htm)



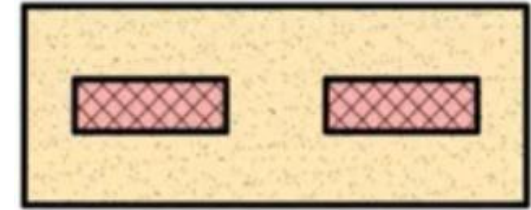
# Виды теплотехнических неоднородностей



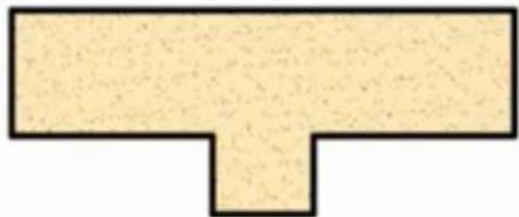
Однородная однослойная конструкция



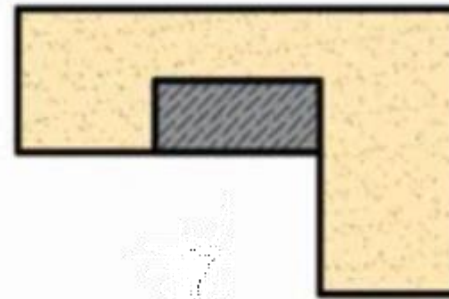
Однородная многослойная конструкция



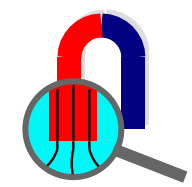
Теплопроводное включение



Геометрически неоднородная конструкция



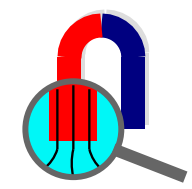
Смешанная конструкция



# Требования ГОСТ

нестационарная теплотехника

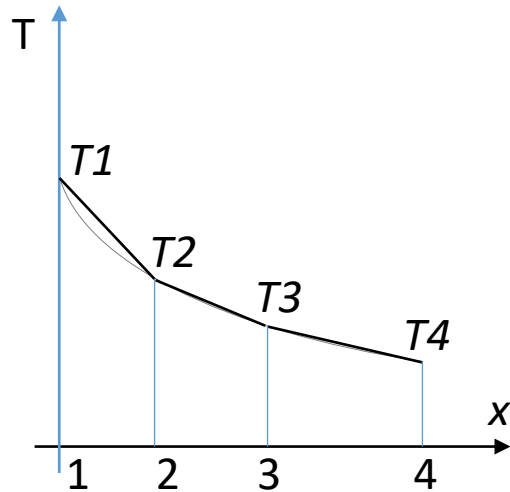
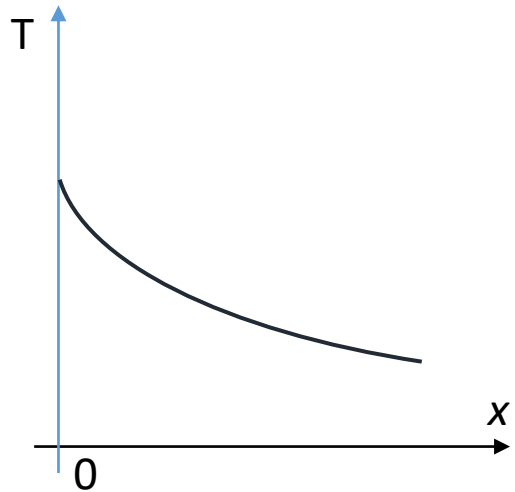
1. Расчеты огнестойкости металлических и ж/б конструкций (ГОСТ 30247.0-94)
2. Расчет теплоусвоения (СП 50.13330-2012)
3. Расчет теплоустойчивости (ГОСТ 26253-2014)



# Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности

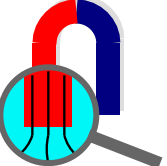
В простейшем случае, если  $\lambda = \text{const}$  и нет объемного тепловыделения, то дифференциальное уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0$$

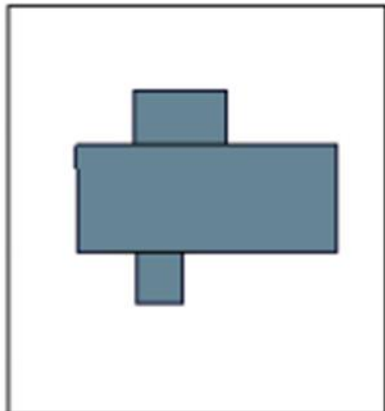


*Основная идея МКЭ состоит в том, что изменение любой непрерывной величины можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей (элементов)*

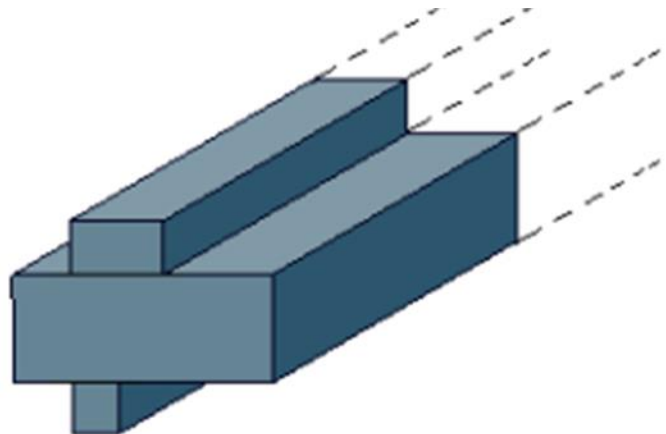
Вычисление узловых значений  $T_1, T_2, T_3, T_4$  основано на минимизации некоего функционала, определяемой физической сущностью задачи (статика, теплопроводность, и так далее), а также граничными условиями. Если анализируется распространение тепла, то минимизируется функционал, связанный с уравнением теплопроводности.



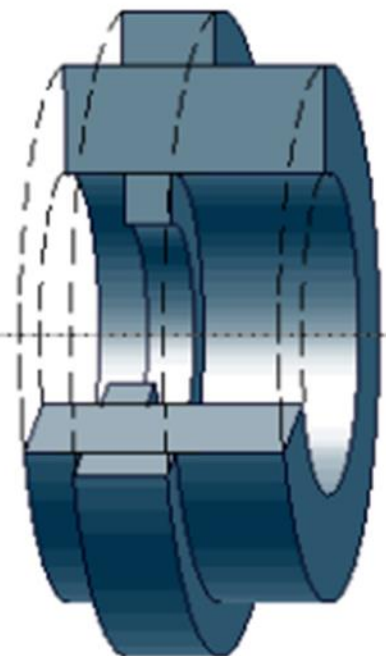
# Геометрическая модель



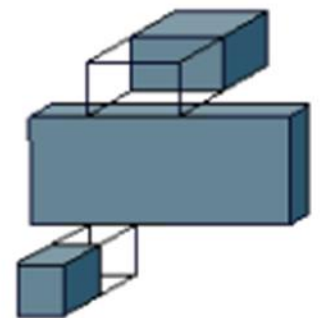
Модель на экране



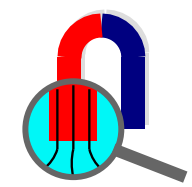
Плоско-параллельная



Осесимметричная



3D-вытягивание



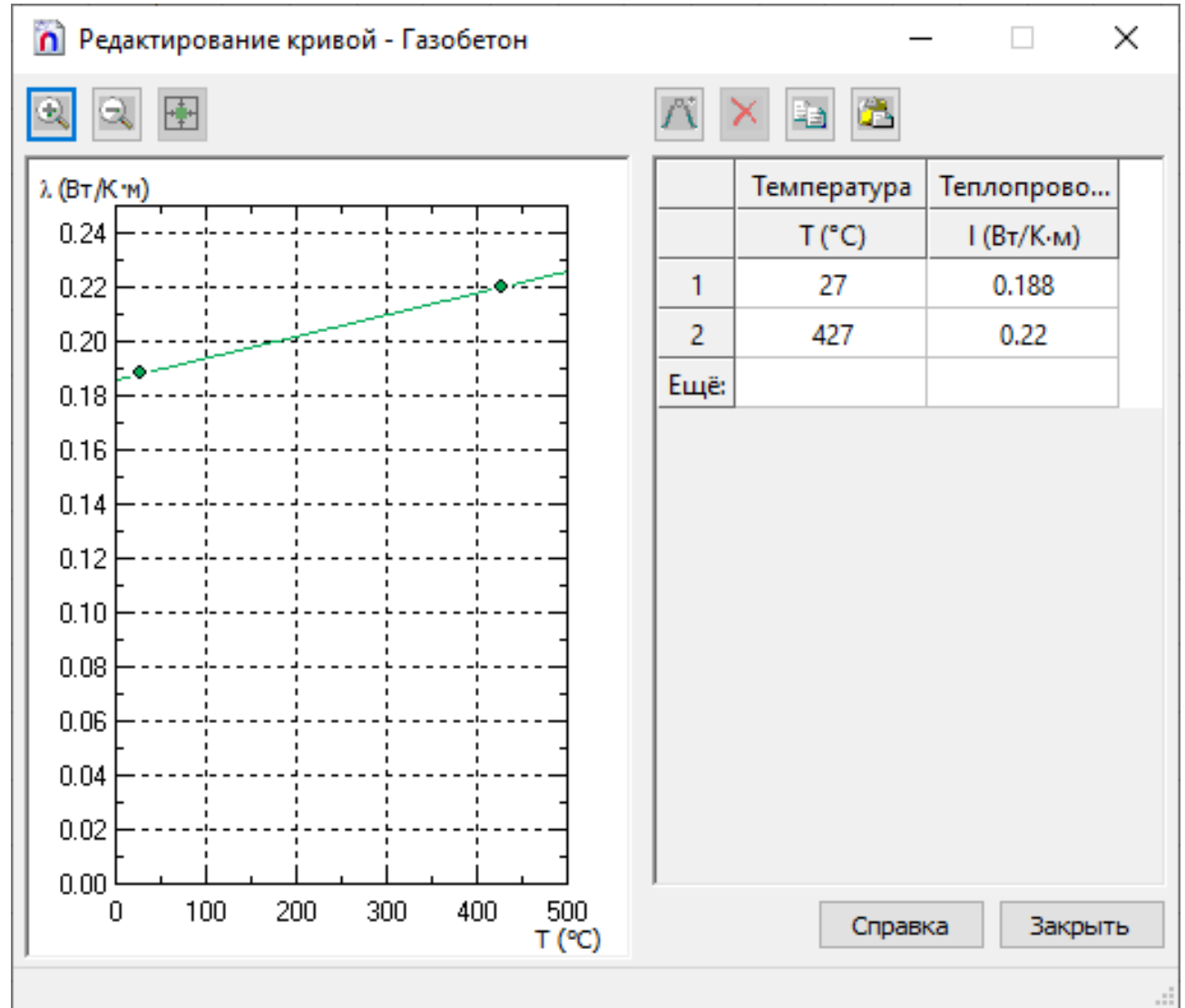
# Создание геометрической модели

1. Встроенный графический редактор
  - a. 2D модели
  - b. 3D модель вытягивания
  
2. Внешние CAD-системы (AutoCAD, BricsCAD, FreeCAD, SolidWorks и др.)
  - a. Импорт DXF
  - b. Импорт STEP (3D формат)
  
3. Экспорт DXF во внешнюю CAD-систему

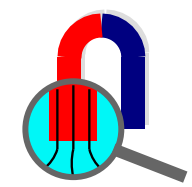
# Учет нелинейных свойств материалов

В программе ELCUT поддерживается задание анизотропной теплопроводности или зависимость теплотехнических свойств от температуры

Учет зависимости теплопроводности, теплоемкости и плотности от температуры задается удобным табличным способом с автоматической интерполяцией







# Граничные условия

Минимизация функционала и удовлетворение граничным условиям однозначно определяют решение.

## Виды граничных условий

1. Граничные условия первого рода задают температуру на поверхности:  $T_{x,y,z \in S} = T_S(x, y, z, \tau)$
2. Граничные условия второго рода задают плотность теплового потока на поверхности:  $q_{x,y,z \in S} = q_S(x, y, z, \tau)$
3. Граничные условия третьего рода определяют конвективный теплообмен между средой и поверхностью:  $q_S(x, y, z, \tau) = \alpha(T_{CP} - T_S)$
4. Граничное условие радиации может быть задано на внешней границе модели. Оно описывает радиационный теплообмен и определяется следующим образом:

$$F_n = \beta \cdot k_{SB} \cdot (T^4 - T_0^4),$$

где  $k_{SB}$  - константа Стефана-Больцмана ( $5.67032 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>/К<sup>4</sup>),  $\beta$  - коэффициент излучения поверхности и  $T_0$  - температура поглощающей среды в Кельвинах.

Свойства метки ребра - Новая метка

Общие

Температура:  $T = T_0$   
 $T_0 = 0$  (°C)

Тепловой поток:  $F_n = -q$  ( $\Delta F_n = -q$ )  
 $q = 0$  (Вт/м<sup>2</sup>)

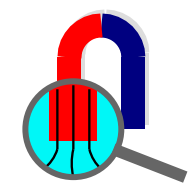
Конвекция:  $F_n = \alpha(T - T_0)$  **f**  
 $\alpha = 0$  (Вт/К·м<sup>2</sup>)  
 $T_0 = 0$  (°C)

Радиация:  $F_n = \beta \cdot k_{sb} \cdot (T^4 - T_0^4)$   
 $\beta = 0$   
 $T_0 = 0$  (°C)

Равная температура:  $T = \text{const}$

Четная периодичность:  $T_1 = T_2$   
 Нечетная периодичность:  $T_1 = -T_2$

OK Отмена Справка



# Результаты расчета

## Визуальные результаты на геометрии модели

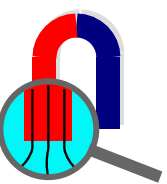
- Поле температур
- Градиент температуры
- Тепловой поток
- Коэффициент теплопроводности
- Векторы теплового потока и градиента температуры
- Изотермы

## Локальные результаты в любой указанной точке

- Координаты точки
- Температура
- Градиент теплового потока
- Тепловой поток
- Теплопроводность

## Интегральные результаты (предварительно определяется контур)

- Длина контура
- Площадь поверхности
- Интегральный тепловой поток, Вт
- Разница температур на концах контура, °С
- Средняя температура поверхности, °С
- Интеграл от плотности теплового потока вдоль контура, Вт/м
- Интеграл градиента температуры ( $\text{grad}(T)$ ) по поверхности, °К\*м



# Получение изотермы точки росы

Свойства картины поля

Изотермы      Шаг:  °C  
Опорное:  °C

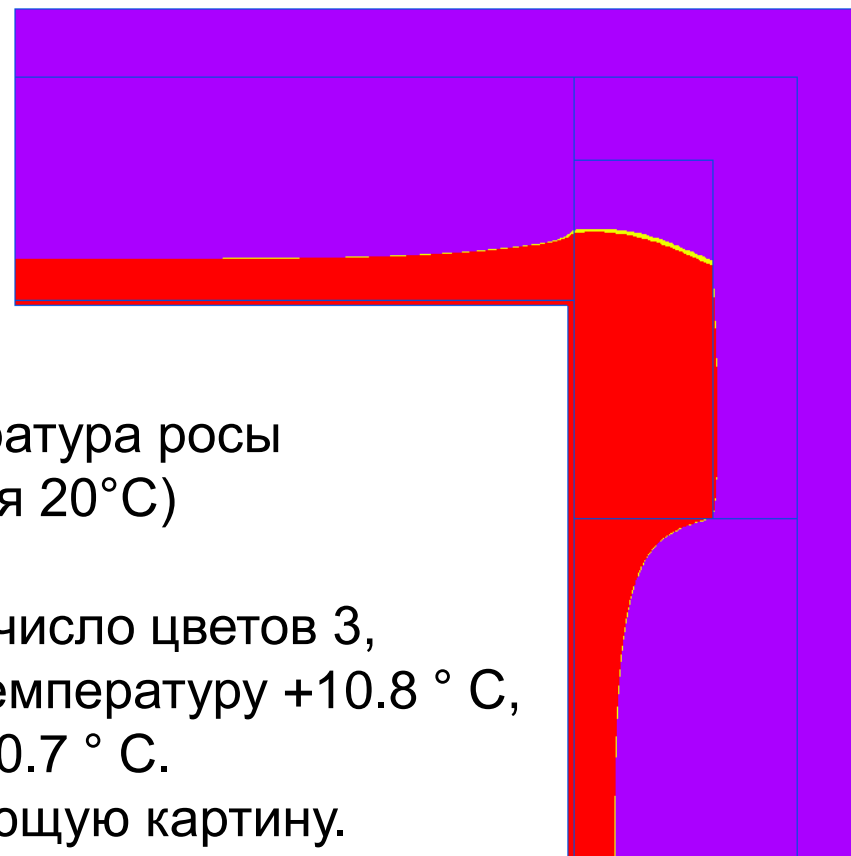
Векторы:      Масштаб:   
 Градиент температуры G      Шаг сетки:  м  
 Тепловой поток F

Цветная карта:

Температура      Температура T      Число цветов:   
 Градиент температуры      Максимум:  °C  
 Тепловой поток      Минимум:  °C  
 Прочие величины

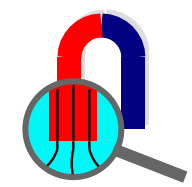
Конечные элементы

OK  
Применить  
Отмена  
Справка  
Совет

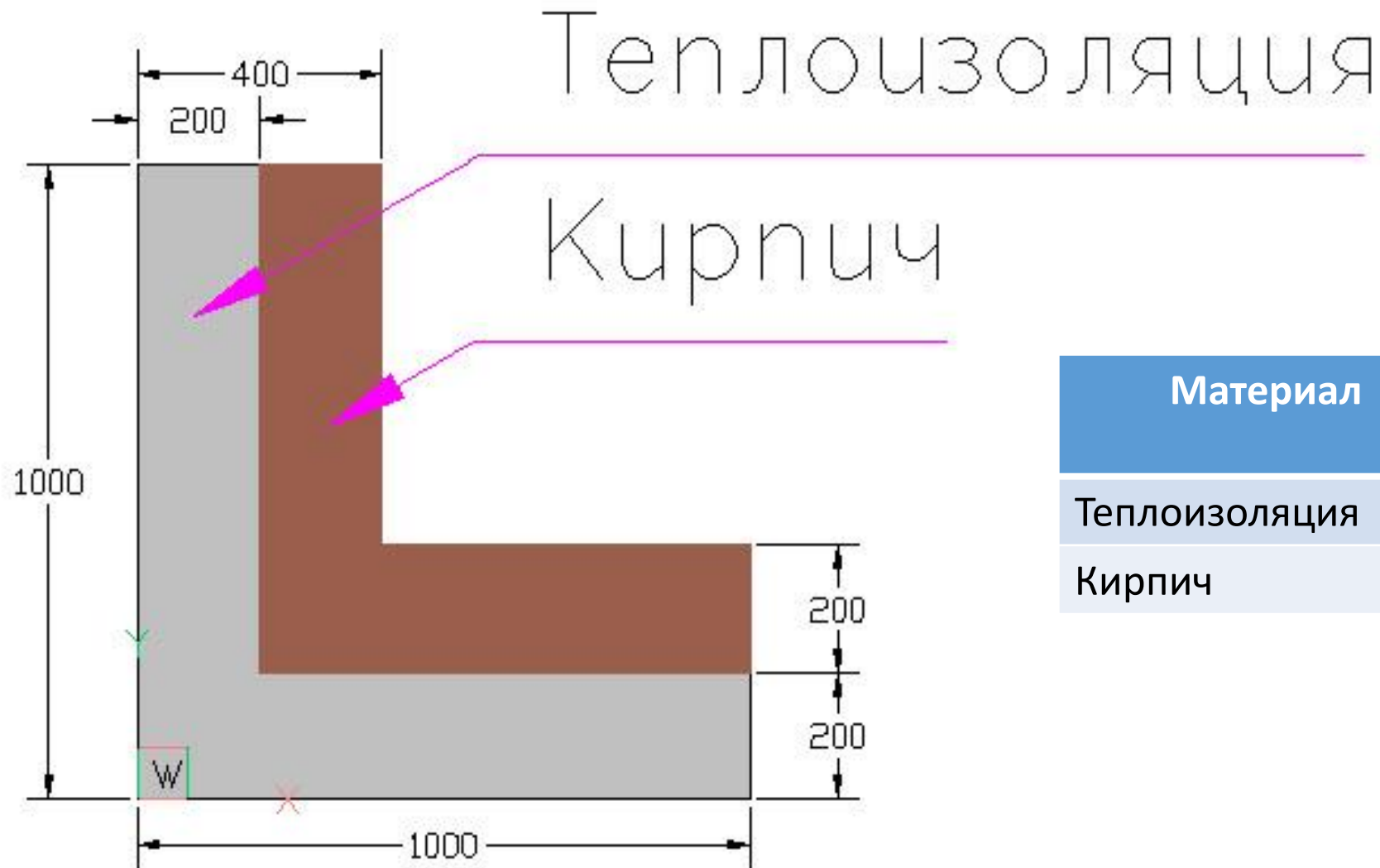


Допустим температура росы  
 $10.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ . (55% для  $20^\circ\text{C}$ )

Тогда выбираем число цветов 3,  
максимальную температуру  $+10.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  
минимальную  $+10.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ .  
Получаем следующую картину.

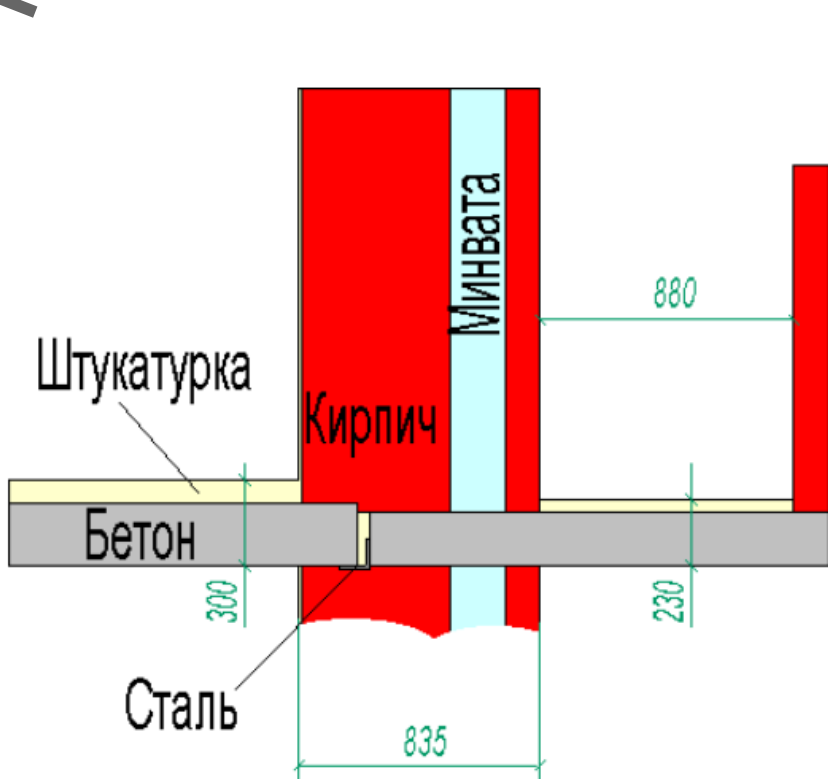


# Модель 2D



Материал	Теплопроводность, Вт/м*°С
Теплоизоляция	0.04
Кирпич	0.4

# Примыкание балконной плиты (модель 2D)

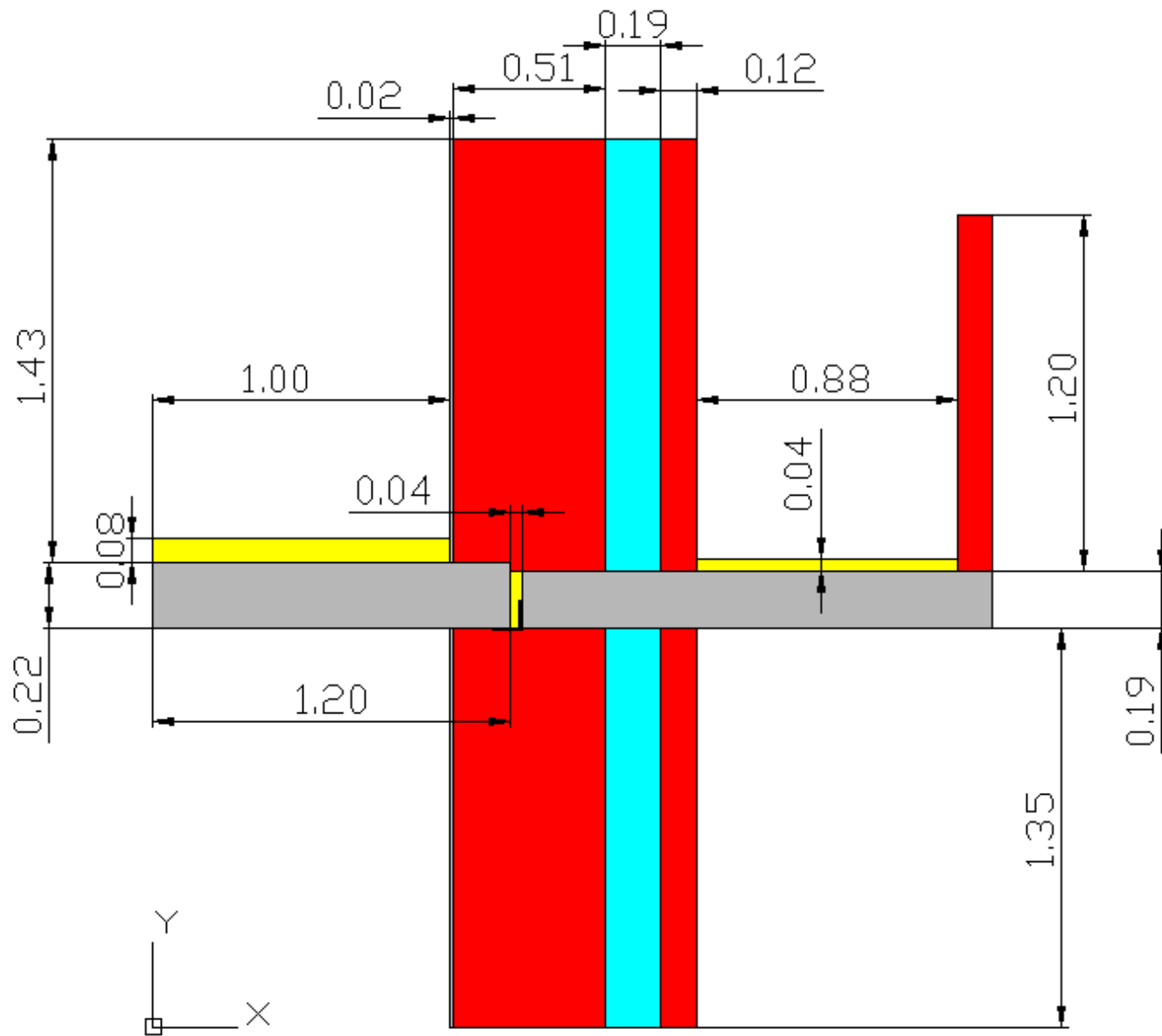


1. Ж/Б,  $\lambda = 2.04 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$

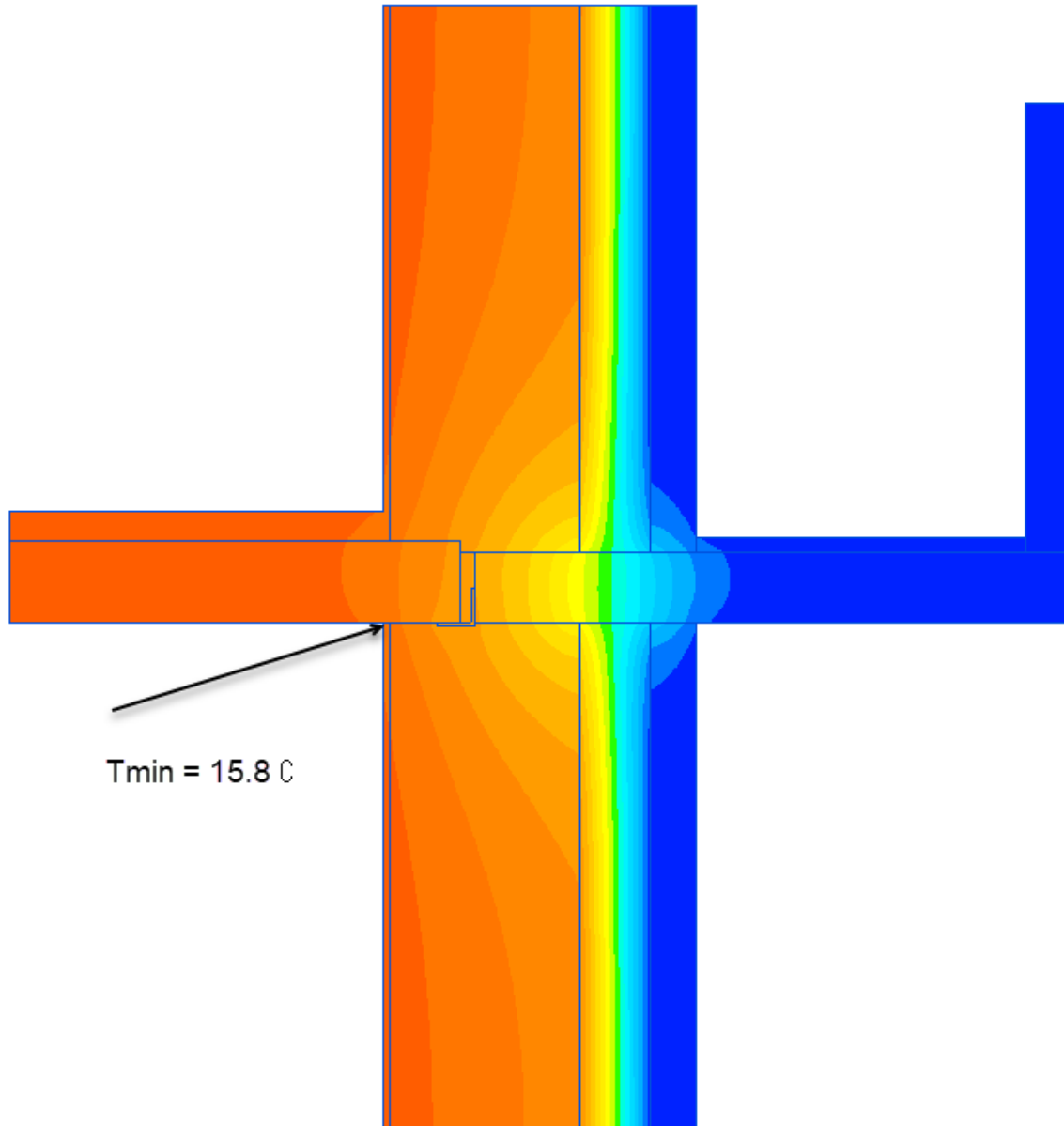
2. Кирпич,  $\lambda = 0.87 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$

3. Минвата,  $\lambda = 0.041 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$

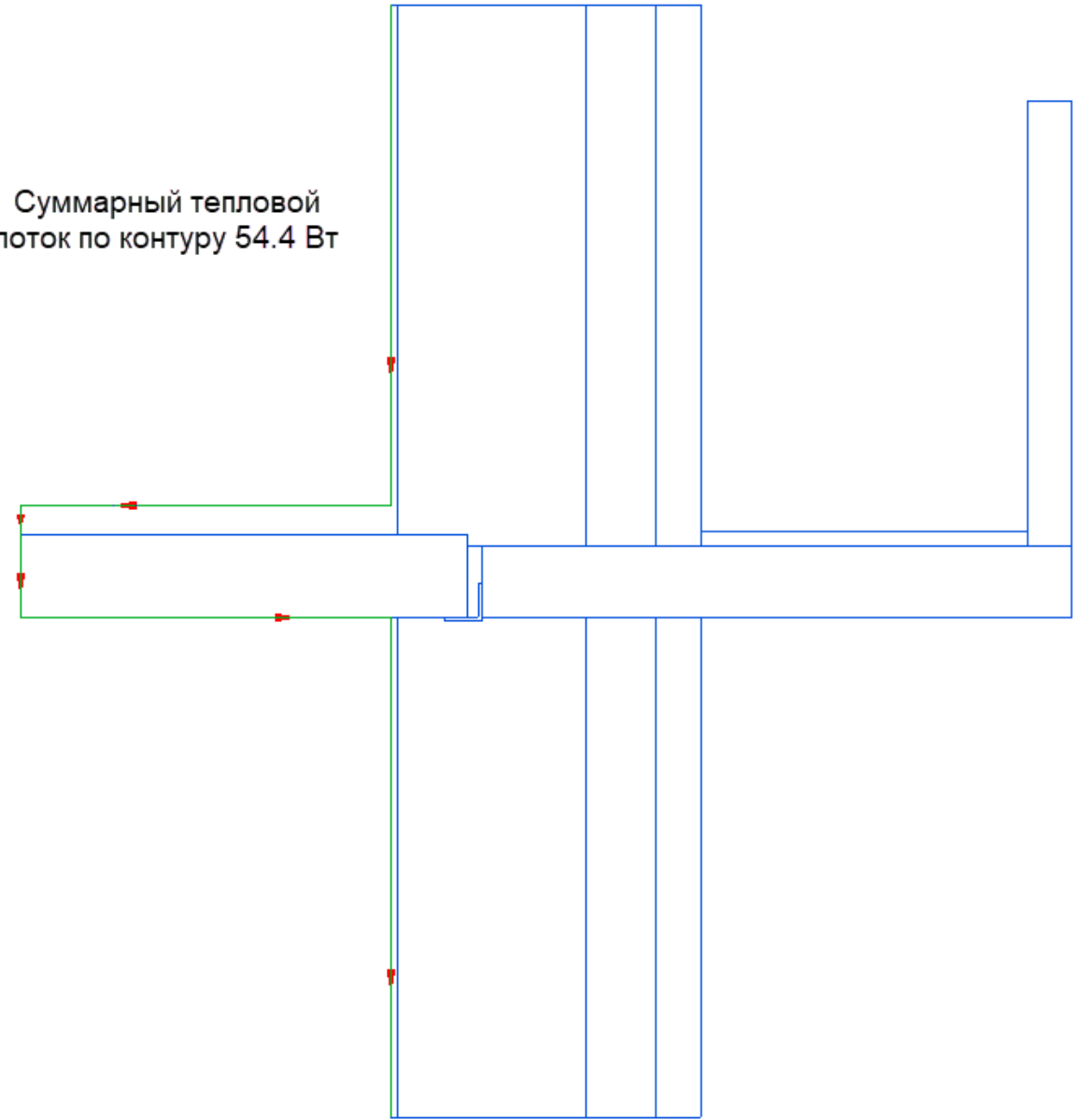
4. Штукатурка,  $\lambda = 0.93 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$

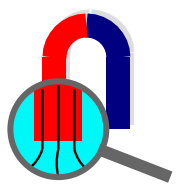


# Примыкание балконной плиты (модель 2D)

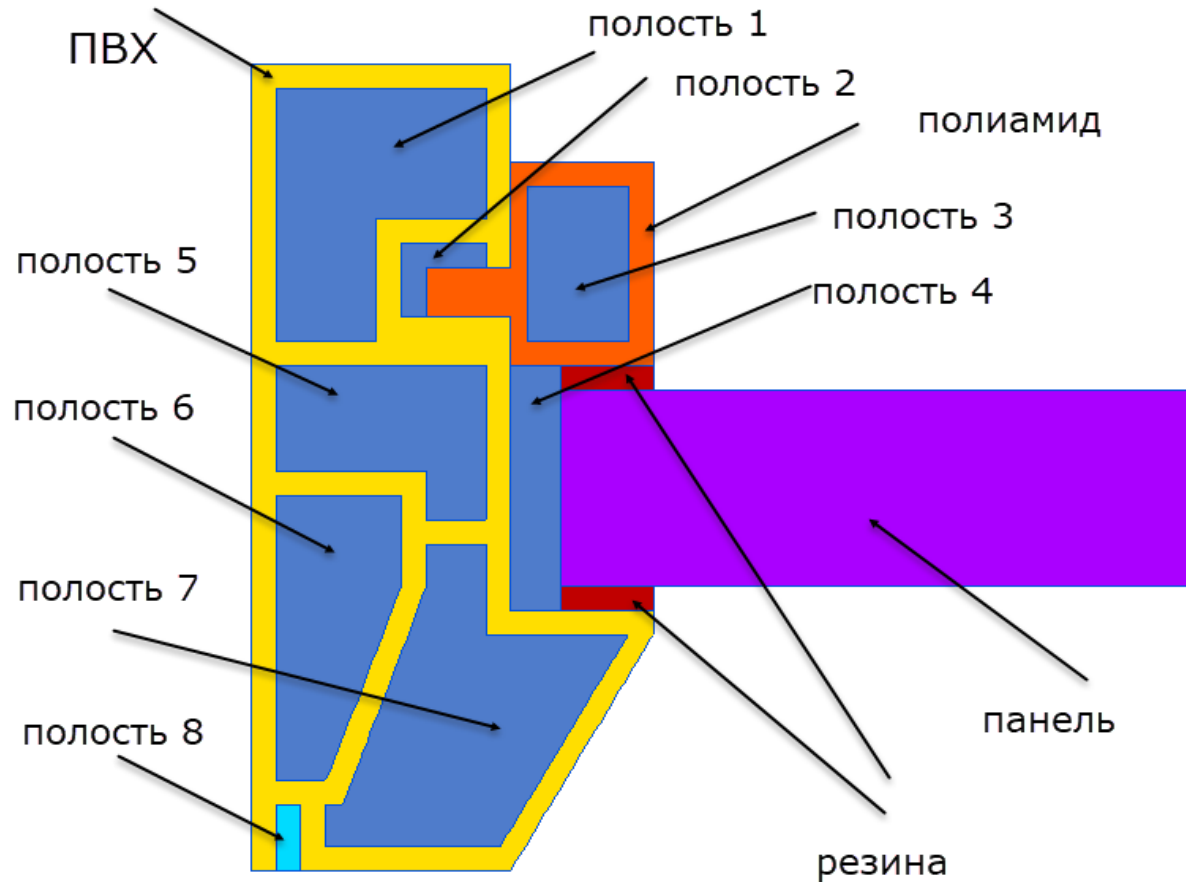


Суммарный тепловой  
поток по контуру 54.4 Вт





# Расчет рам по методике ISO 10077-2



Полиамид  $\lambda = 0.25 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$ .

Резина  $\lambda = 0.25 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$ .

ПВХ  $\lambda = 0.17 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$ .

Панель  $\lambda = 0.035 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$ .

Полость 1  $\lambda = 0.117 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

Полость 2  $\lambda = 0.047 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

Полость 3  $\lambda = 0.075 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

Полость 4  $\lambda = 0.115 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

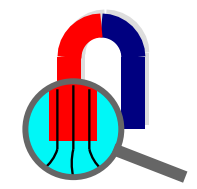
Полость 5  $\lambda = 0.077 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

Полость 6  $\lambda = 0.118 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

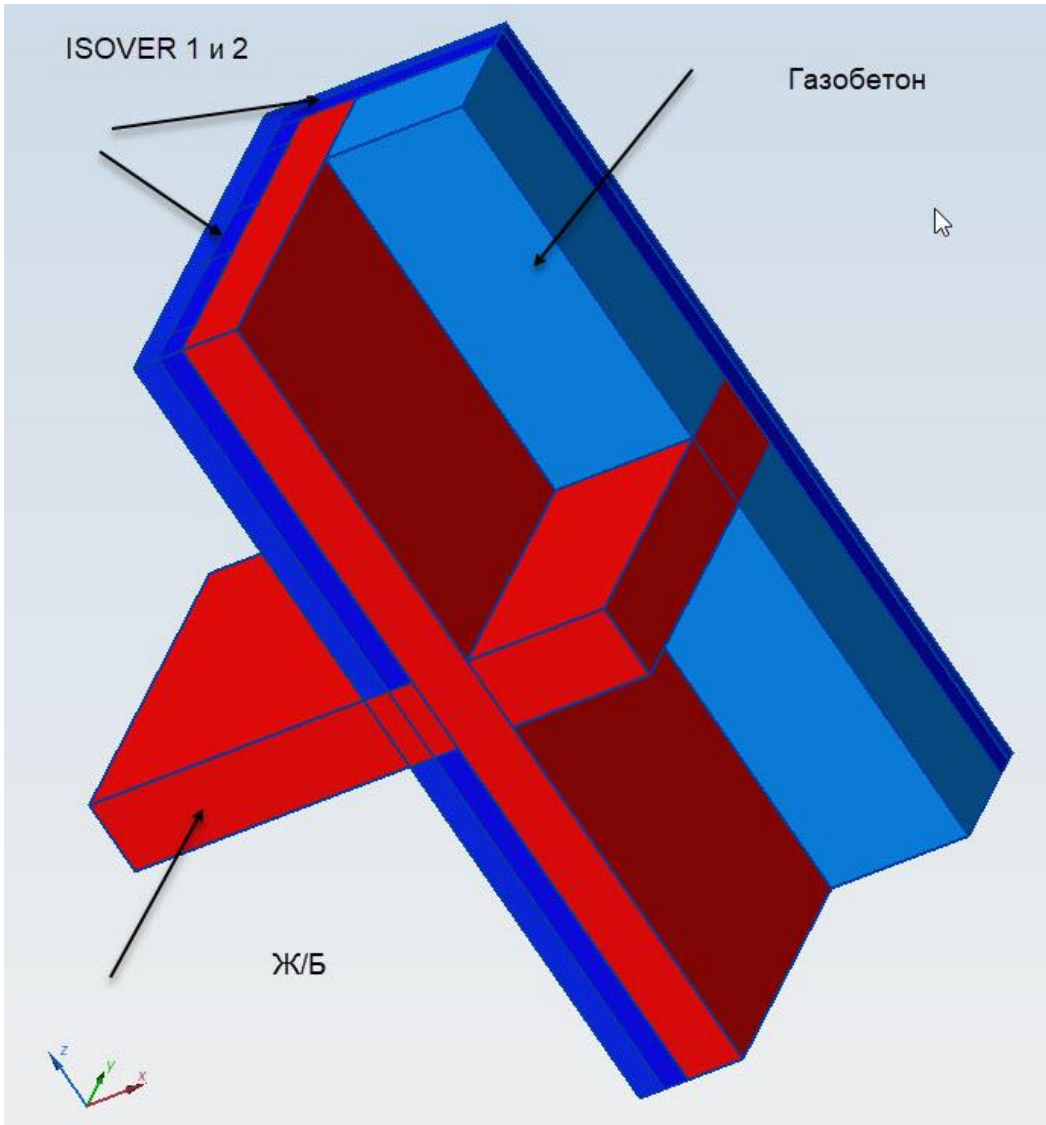
Полость 7  $\lambda = 0.104 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

Полость 8  $\lambda = 0.083 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$

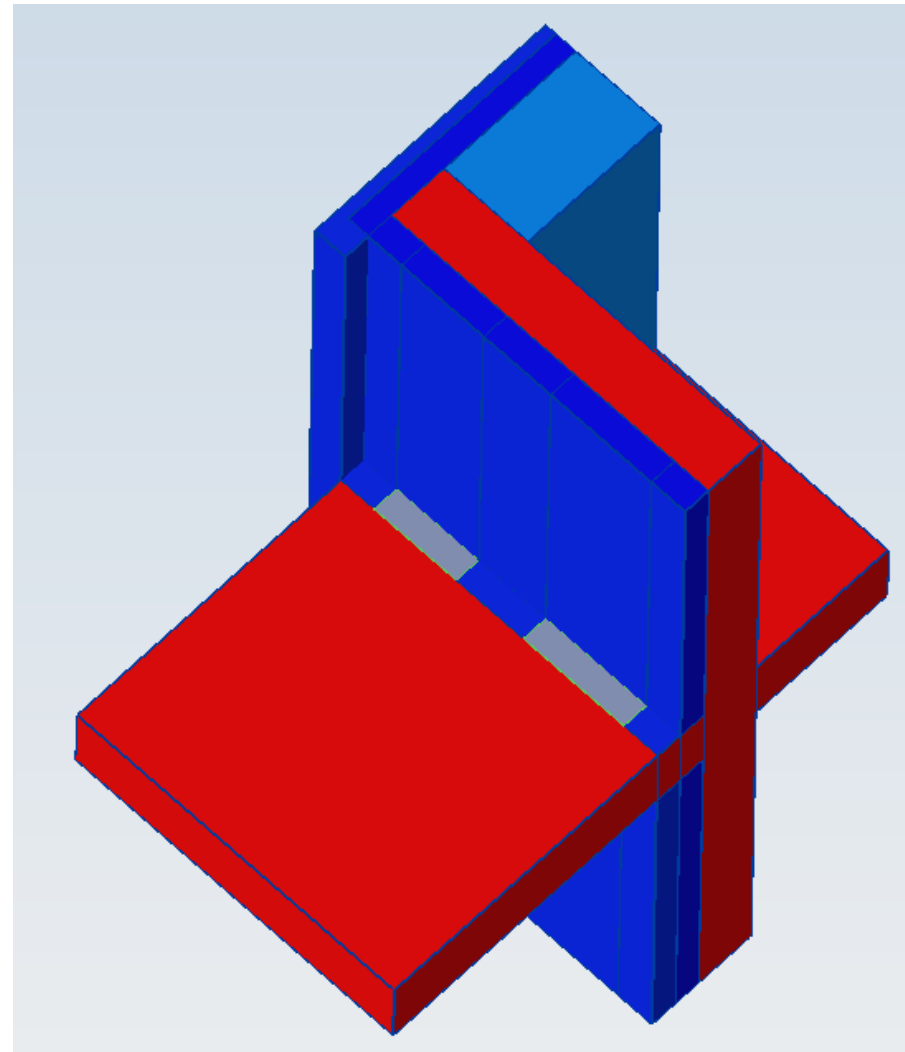
Коэффициенты теплопроводности полостей рассчитываются с помощью итерационной процедуры с помощью макроса EXCEL



# Модель 3D с термовкладышами

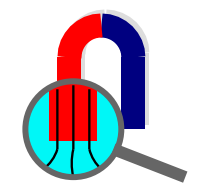


Применяемые материалы

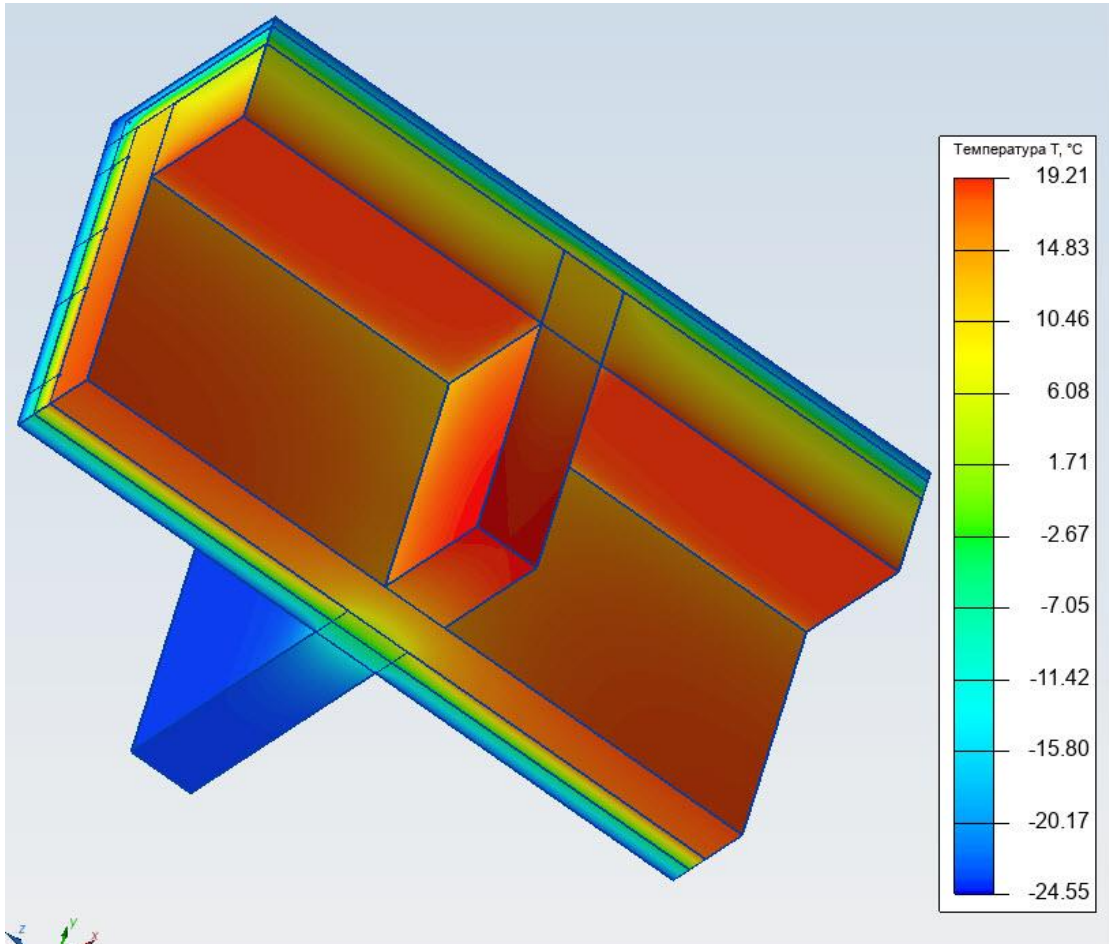


Положение вкладышей

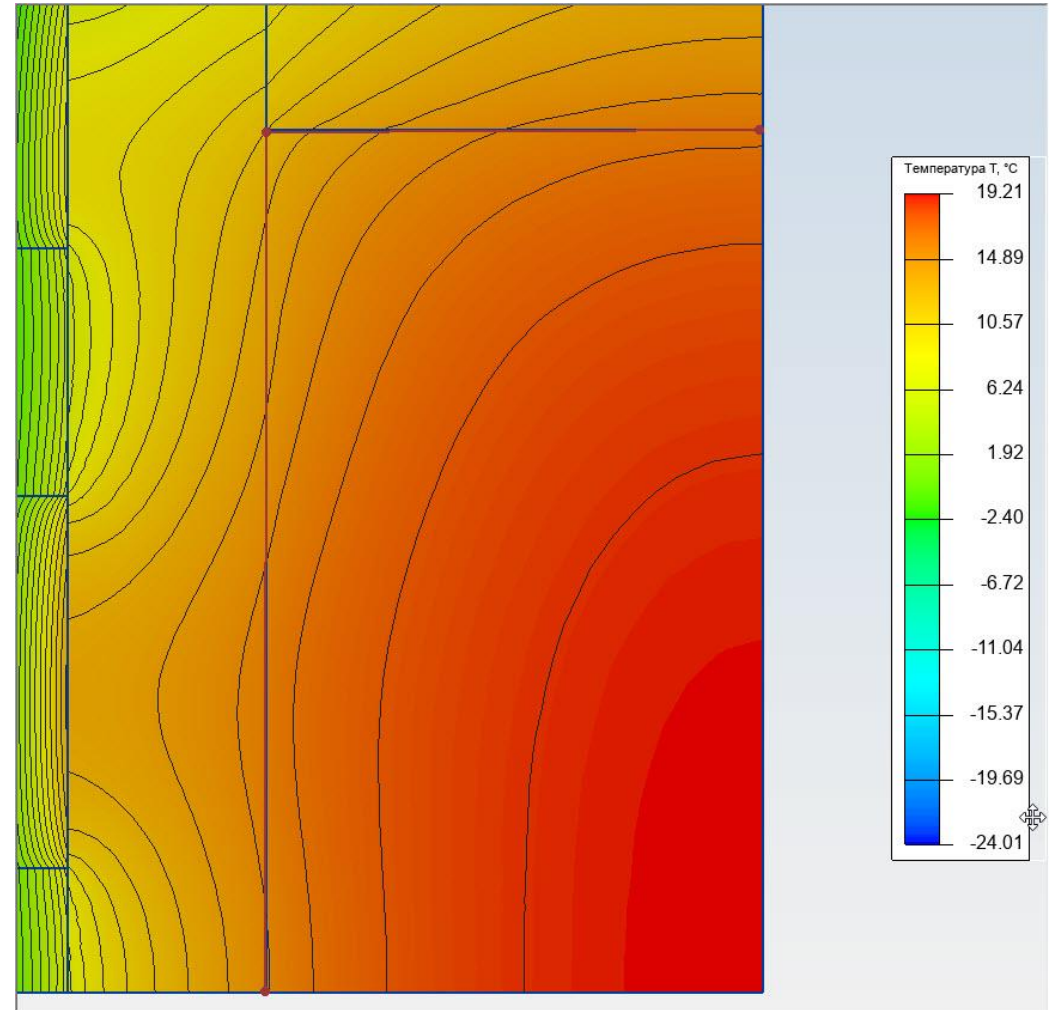




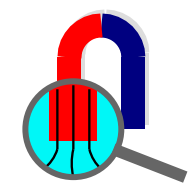
# Модель 3D с термовкладышами



Общее температурное поле

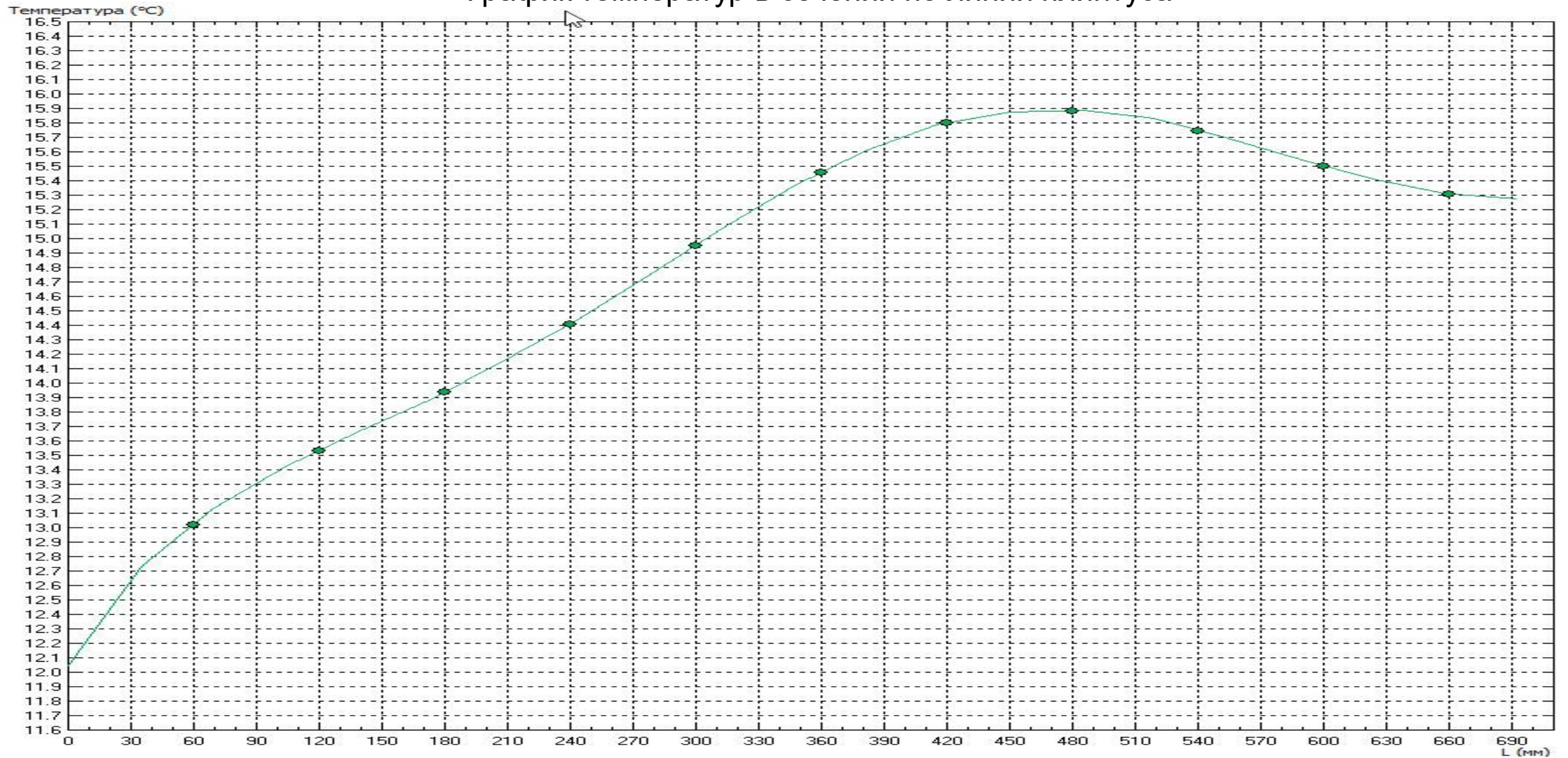


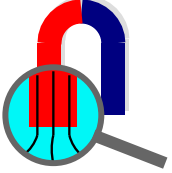
Температурное поле в сечении



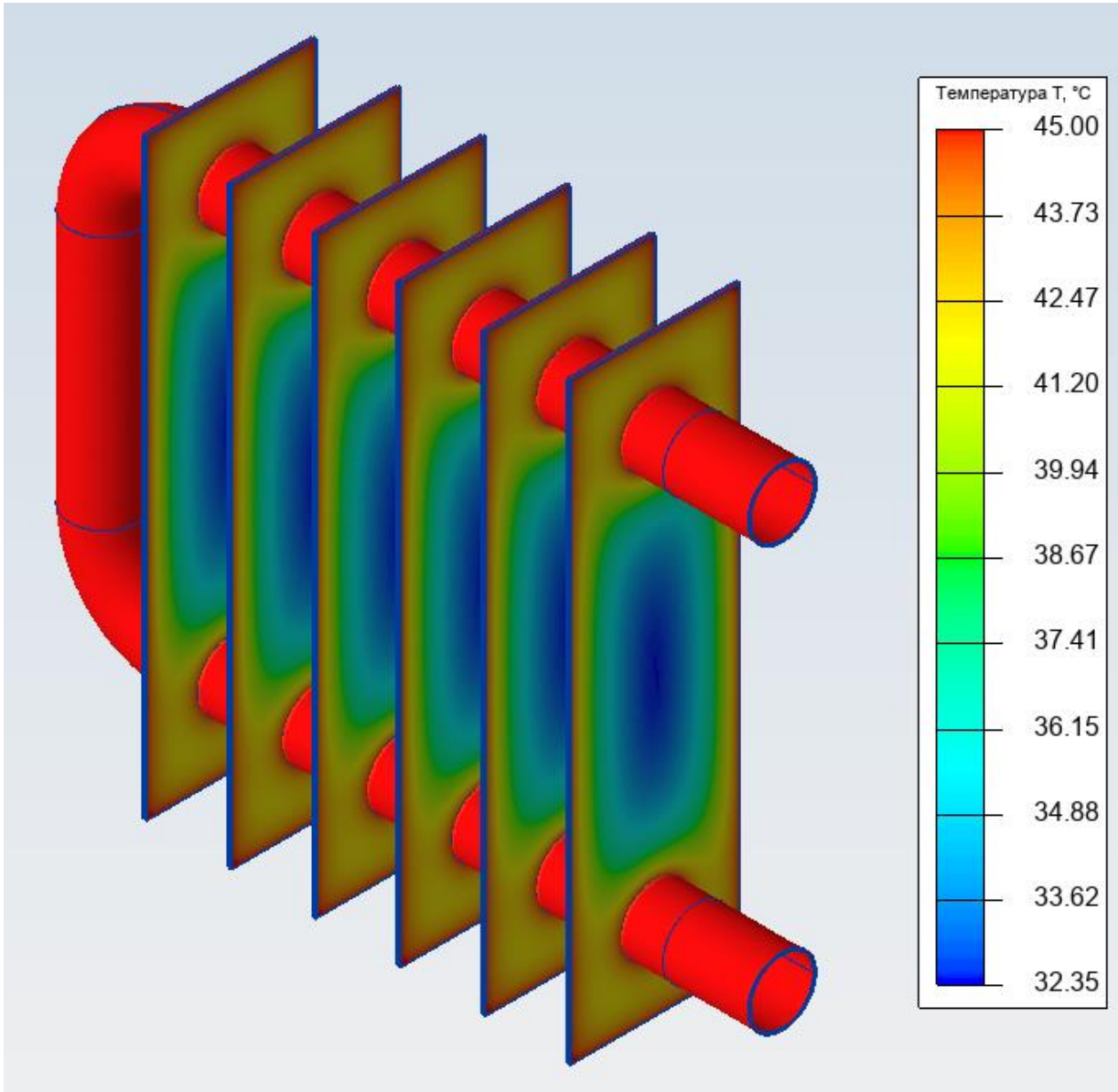
# Модель 3D с термовкладышами

График температур в сечении по линии плинтуса





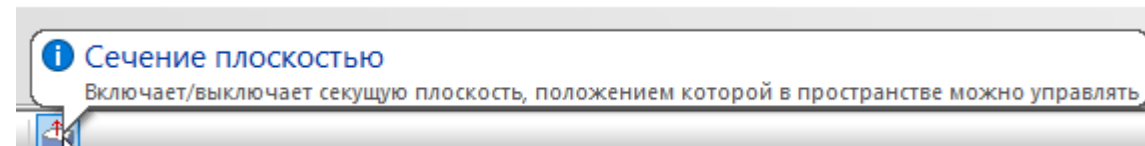
# Определение теплотворной способности радиатора



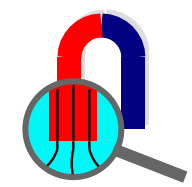
Модель импортируется в ELCUT в формате STEP. Каждому типу поверхности можно назначить свои граничные условия теплопередачи конвекцией и радиацией.

Количество отдаваемой теплоты можно получить по метке T= 45

Граничные условия внутри трубы назначаются с помощью секущей плоскости



Теплотворная способность радиатора 360 Вт



**Спасибо за внимание!**

**До новых встреч!**

Ваши вопросы и предложения ждём на наш адрес:

[info@elcut.ru](mailto:info@elcut.ru)