

Решение 3D задач стационарной теплопередачи в ELCUT



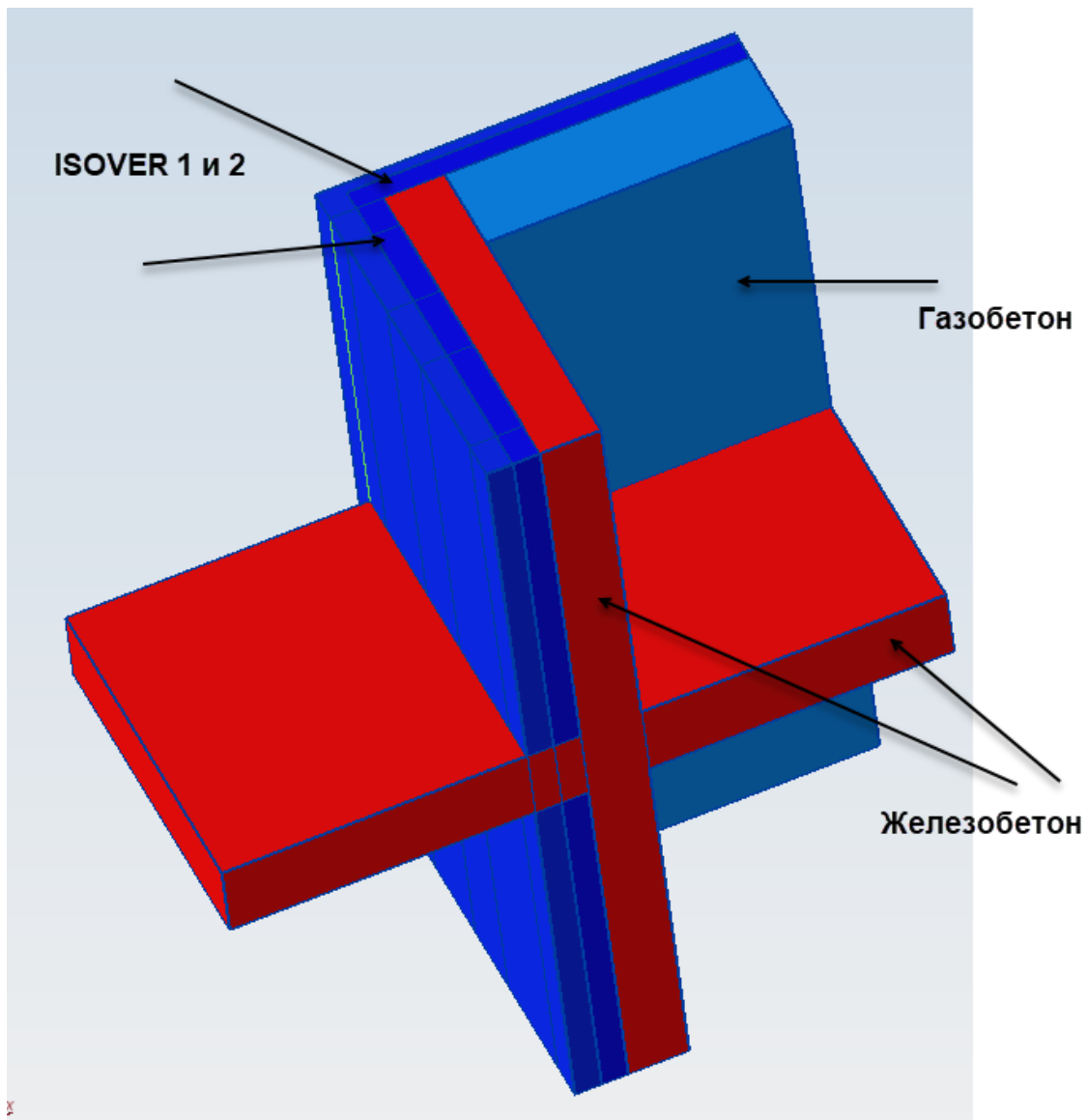
Рехтер Александр Дантонович

Директор ООО «Хайтек»

Alex.Rekhter@elcut.ru

+7 902 331 0949

Модель с термовкладышами

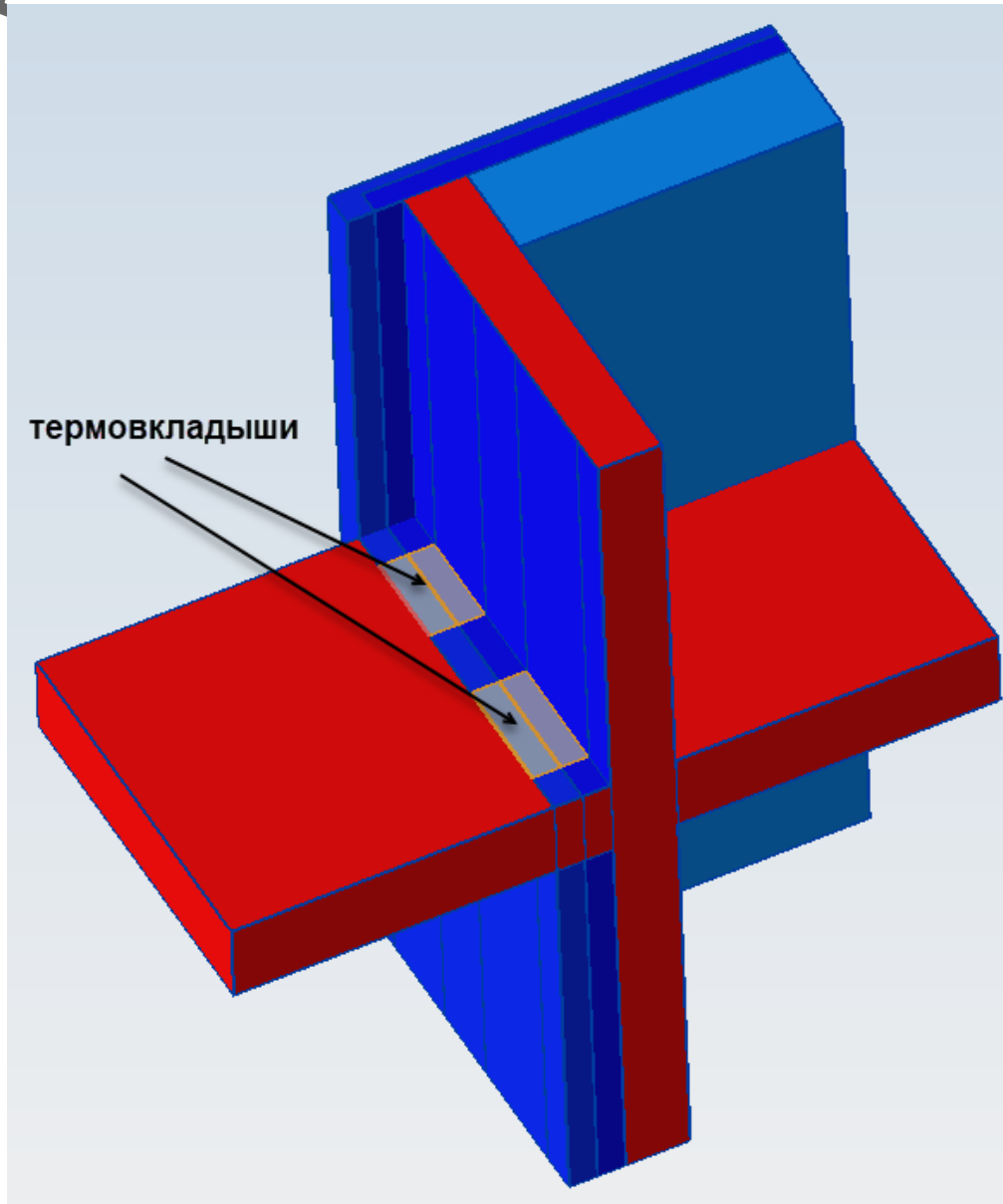


Модель включает плиту перекрытия и балконную плиту из ж/б и стены из газобетона и ж/б, утепленные минватой ISOVER 1 и 2

3D поле тепловых потоков имеет место в области угла. На определенном расстоянии от угла поле становится 2D

С этим связано моделирование ограниченного объема вблизи угла.

Размещение термовкладышей

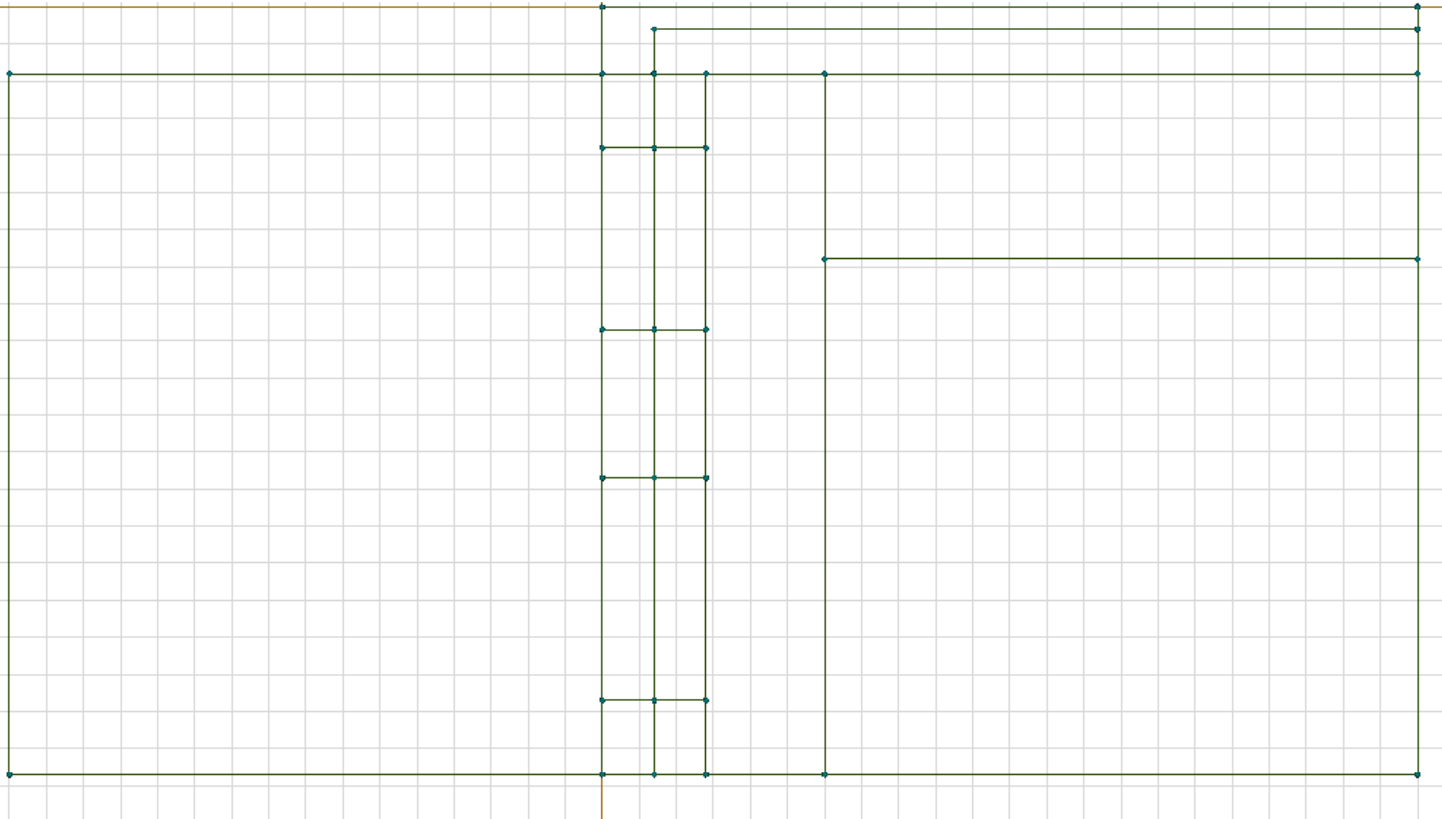


Термовкладыши разделены на половинки, чтобы присваивать различные свойства слоям минваты ISOVER 1 и ISOVER 2

Термовкладыши сделаны из материала с низкой теплопроводностью $0.03 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$

Модель с термовкладышами. 2D основа

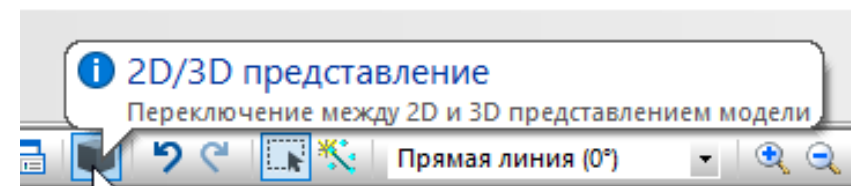
В 3D моделях, получаемых выдавливанием, сначала формируется 2D основа для последующего выдавливания.



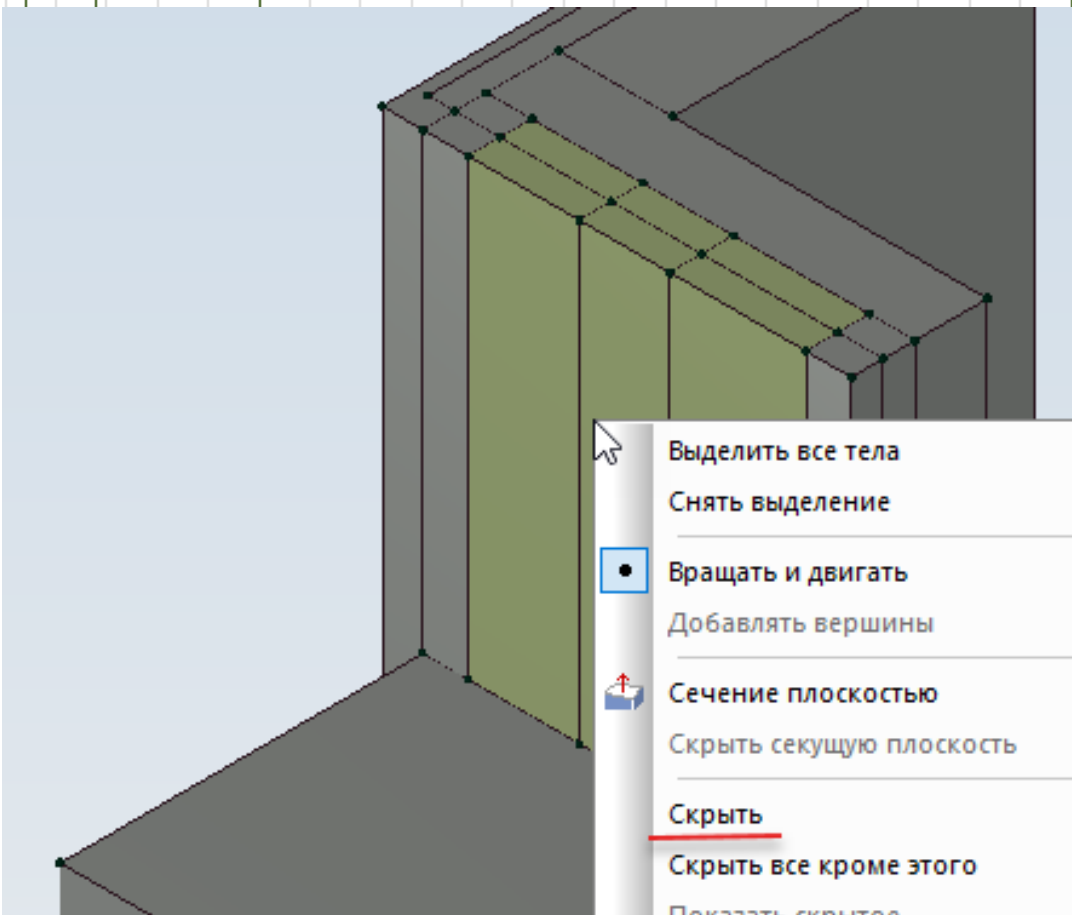
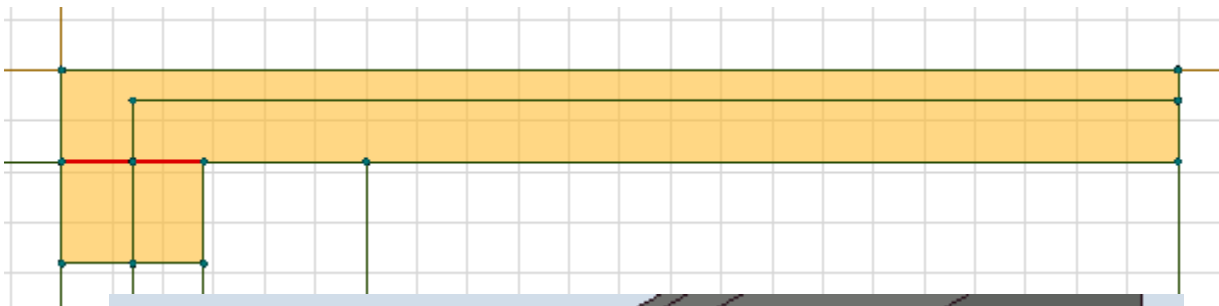
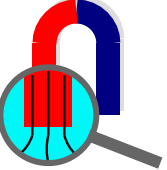
После разбиения модели на конечные элементы в представлении 2D можно переключиться в режим 3D. Размер элементов в 2D представлении напрямую не связан с размером элементов в 3D представлении.

Выполнив двойной щелчок мыши по каждой области, проектировщик на панели **Свойства** задает высотные отметки (уровни), соответствующие границам материалов.

[-] Блок	
Узлов сетки	191
Площадь, мм ²	200000
[-] Уровни, мм	
Уровень	1000
Уровень	0
Уровень	-200
Уровень	-1200
Добавить уровень	



Назначение материалов и граничных условий в модели 3D



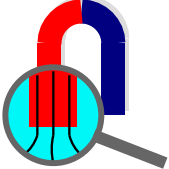
При создании представления 2D надо уже учитывать последующую операцию назначения меток материалов областям.

Например, выделенные области на рисунке слева соответствуют одному материалу, но были добавлены дополнительные границы (красный цвет), чтобы потом можно было для каждой области указать свои высотные отметки.

Чтобы назначить метки материалов телам, моделирующим термовкладыши, необходимо скрыть отображение тел, которые находятся над ними.

Выберите скрываемые тела при нажатой клавише Ctrl, затем нажмите на правую кнопку мыши и щелкните пункт контекстного меню **Скрыть**.

Управление размером сетки



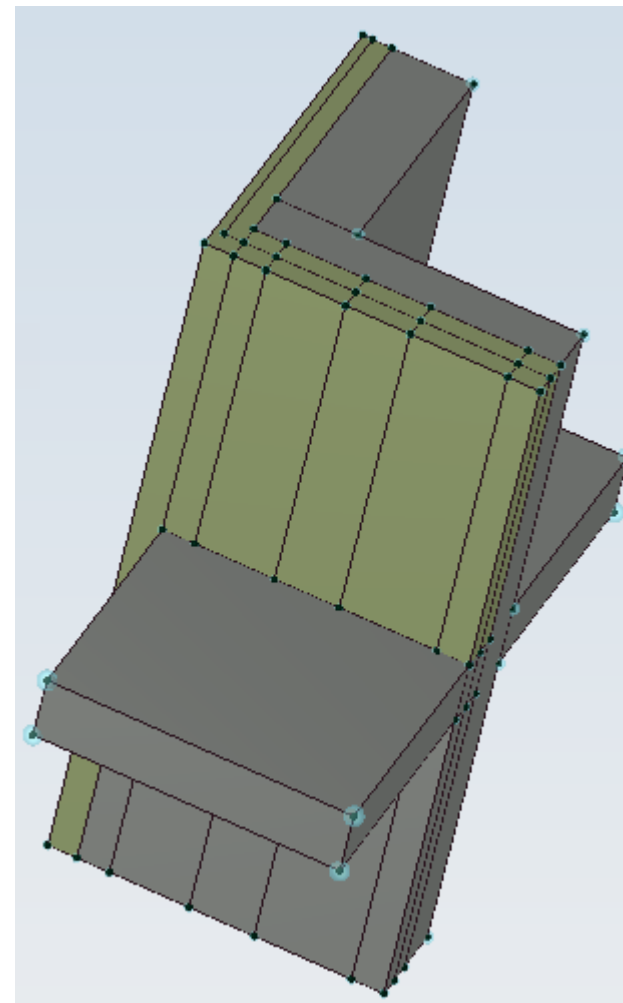
При расчете моделей 3D возрастает потребность управления сеткой. Иногда при автоматическом разбиении, если управление не выполняется, то сетка может получиться неоправданно мелкая, а количество элементов настолько большим, что процесс дискретизации не завершается.

В целом рекомендуется в тех местах, где градиент температуры выше, задавать меньший размер сетки. Размер элемента должен быть также в несколько раз меньше чем размер слоя материала.

Давайте зададим для слоев минваты, термовкладышей и ж/б под минватой размер элемента 14 мм, для стены из ж/б и газобетона – 20 мм и для плиты балконной и перекрытия – 30 мм


Причем сначала зададим размер элемента для плит, чтобы в месте примыкания области плиты к области минваты был размер 14 мм. Последующее назначение шага для смежных областей переприсваивает шаг разбиения пограничных ребер.

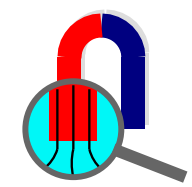
Создавать сетку лучше последовательно. Сначала разбить ребра, затем грани и наконец тела. В этом случае будет ясно в случае проблемы на каком этапе это произошло.



1 2 3



На рисунке справа выбор тел для задания шага разбиения 14 мм. Шаг задается на панели Свойства. Надо иметь ввиду, что если ребра ограничивающие тело, имеют разный шаг разбиения, то при выборе тела шаг не отображается. Голубые сферы в вершинах при нажатой кнопке  свидетельствуют, что пользователь задал собственный размер дискретизации.



Граничные условия

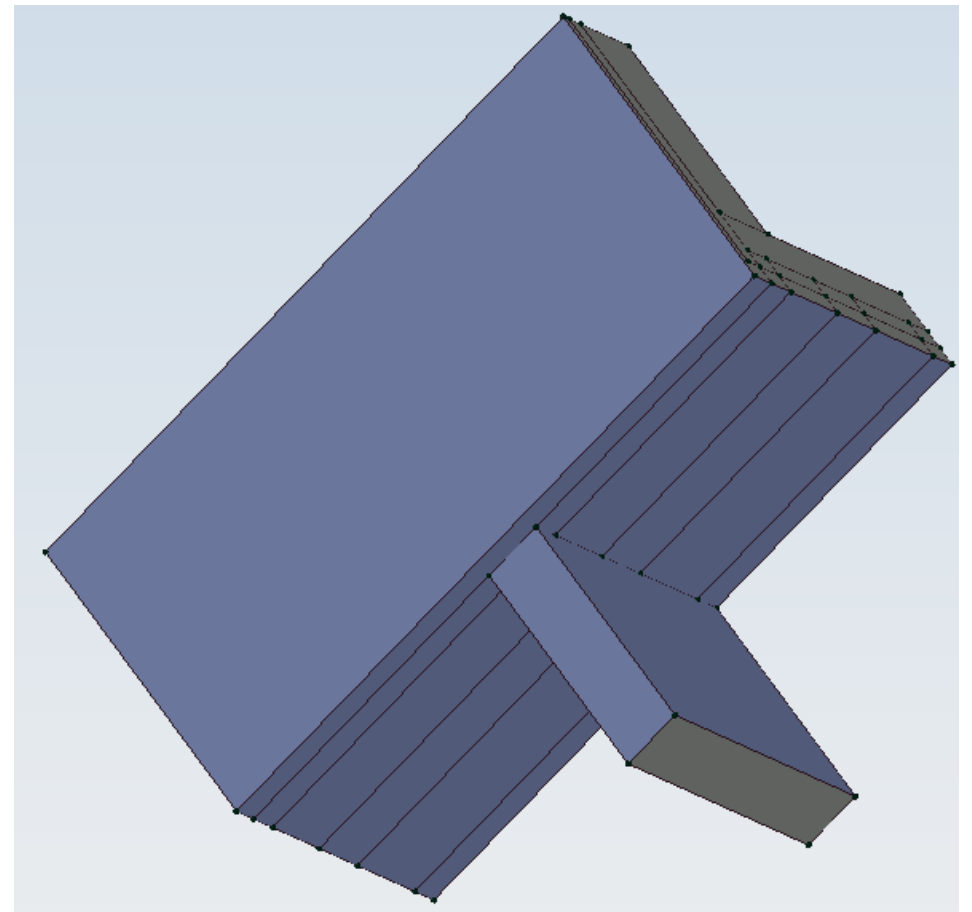
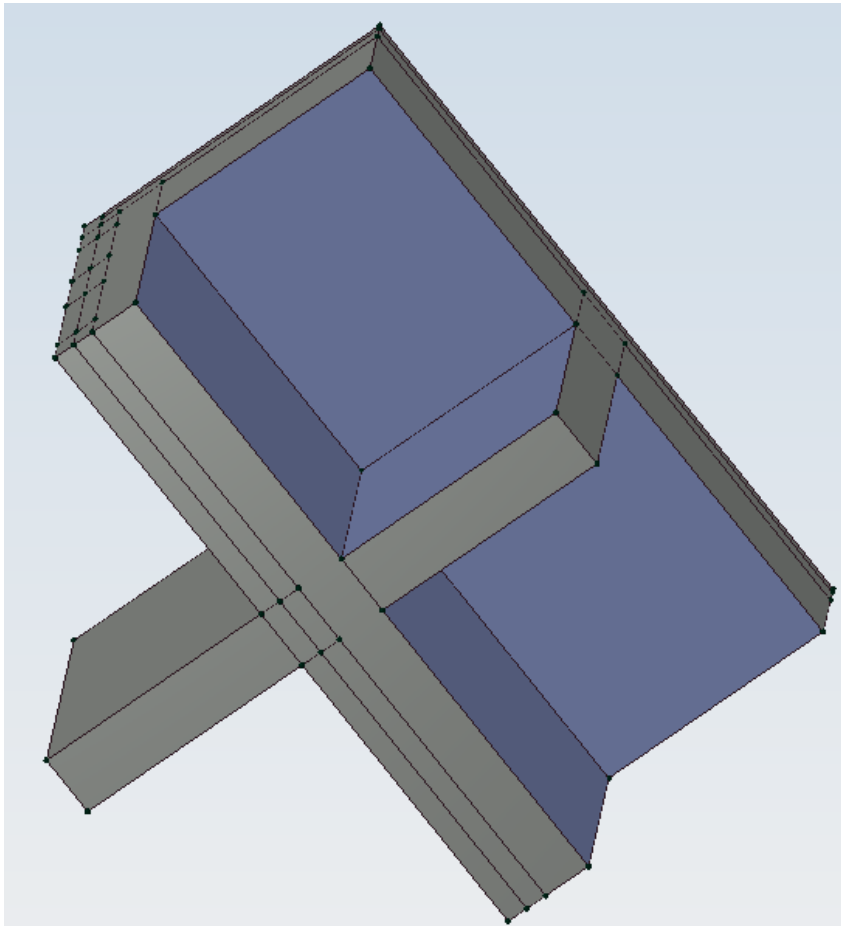
Внутренним поверхностям назначаем граничное условие конвективного теплообмена:

$$t = 20^{\circ}\text{C}, \quad \alpha = 8.7 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

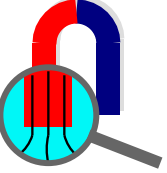
Наружным поверхностям в соответствии с СП назначаем условие конвективного теплообмена,

$$t = -24^{\circ}\text{C}, \quad \alpha = 23 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

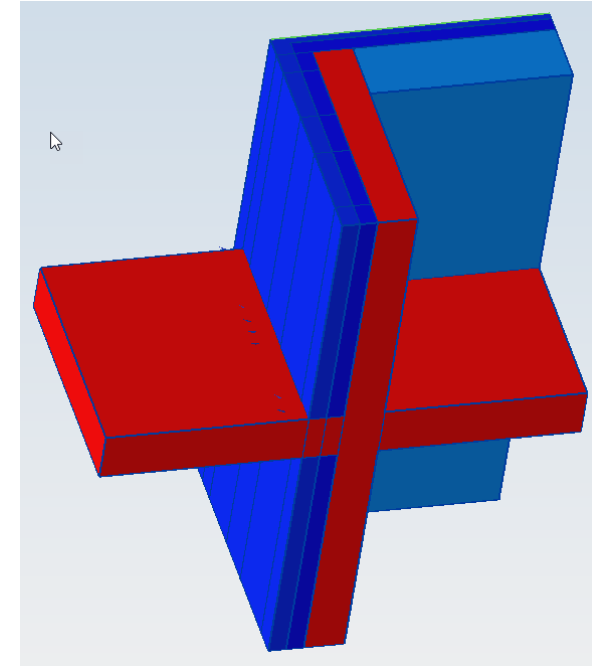
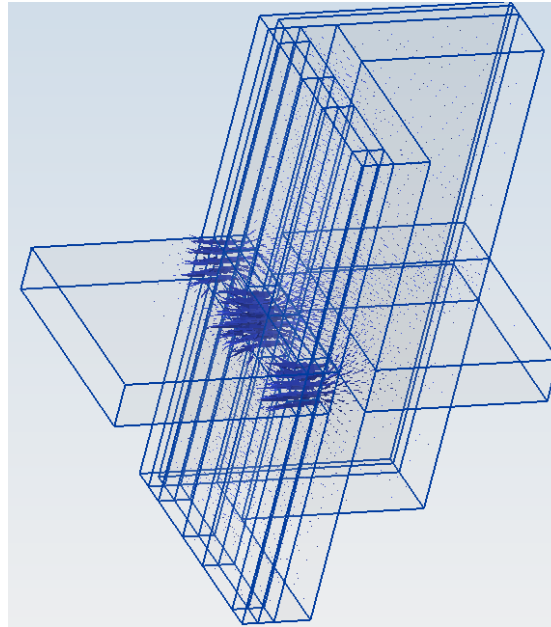
Для граней, лежащих в сечении вертикальными и горизонтальными плоскостями, по умолчанию действует условие $q=0 \text{ Вт/м}^2$ (адиабатные поверхности)



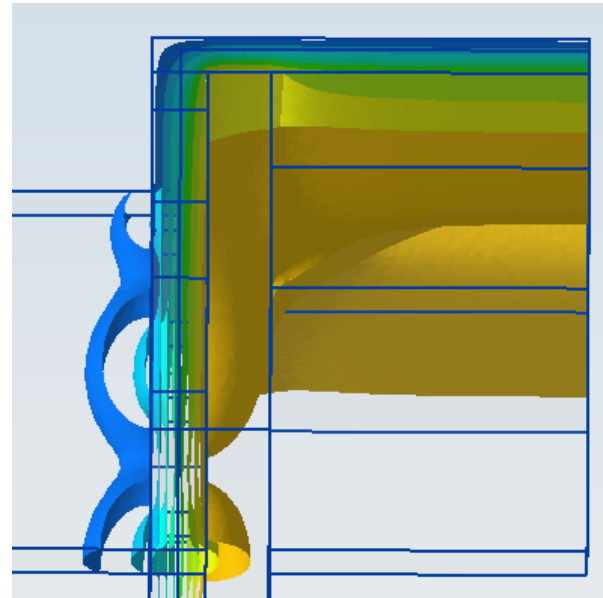
Результаты расчета моделей 3D

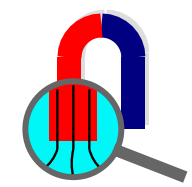


1. Изополя температур, тепловых потоков, градиентов температур и теплопроводности. Всегда можно скрыть любое тело и посмотреть, что происходит под ним. Слева векторы теплового потока, справа отображение теплопроводности тел



2. Температурные изоповерхности с заданным шагом (изополя надо выключить).

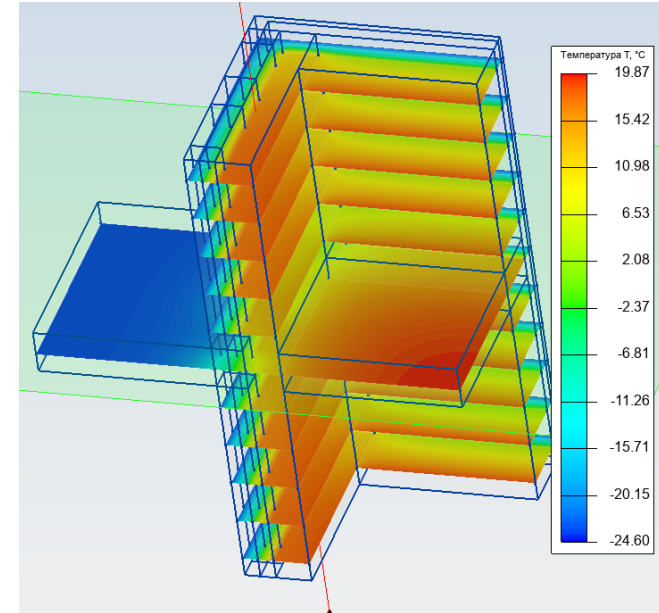




Результаты расчета моделей 3D

(продолжение)

1. Отображение изополей температур, тепловых потоков, градиентов температур и теплопроводности в параллельных сечениях.



2. Результаты расчета в сечении. Можно задать секущую плоскость и получить результат расчета температур, тепловых потоков, градиентов температур, теплопроводности в данном сечении.

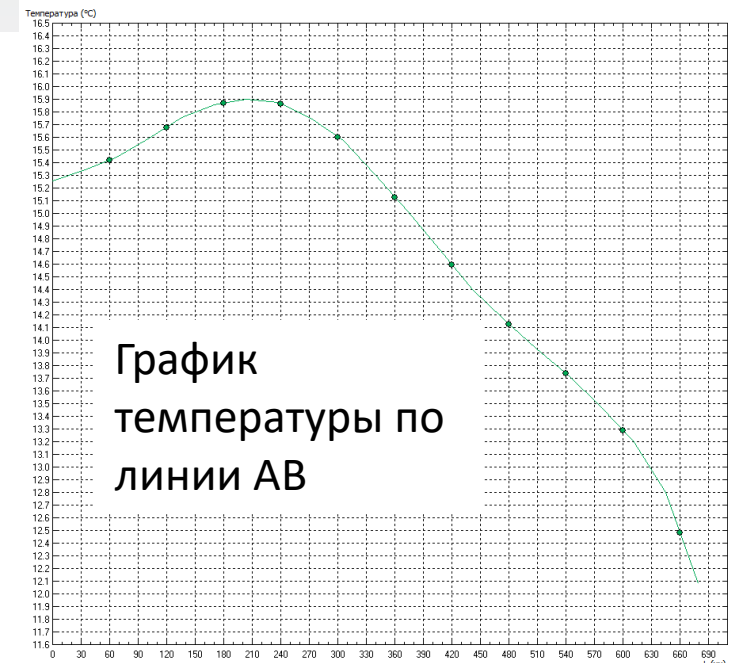
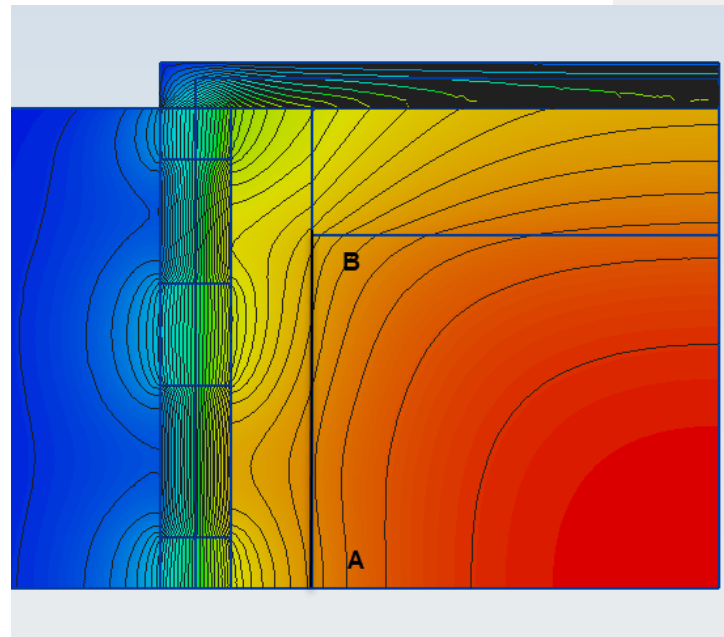
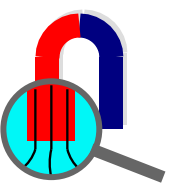


График температуры по линии АВ

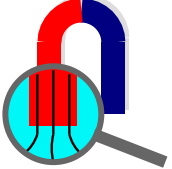
Интегральные показатели



Геометрические величины	
Количество граней	16
Площадь, м ²	6.34
Физические величины	
Тепловой поток, Вт	66.9193
Средняя температура поверхности, °C	-23.4873

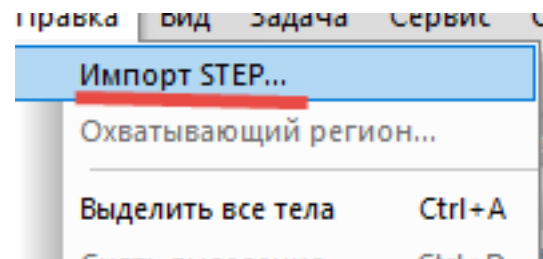
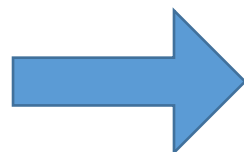
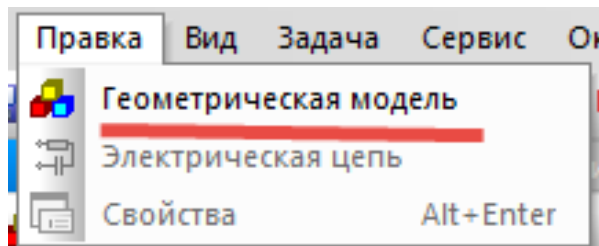
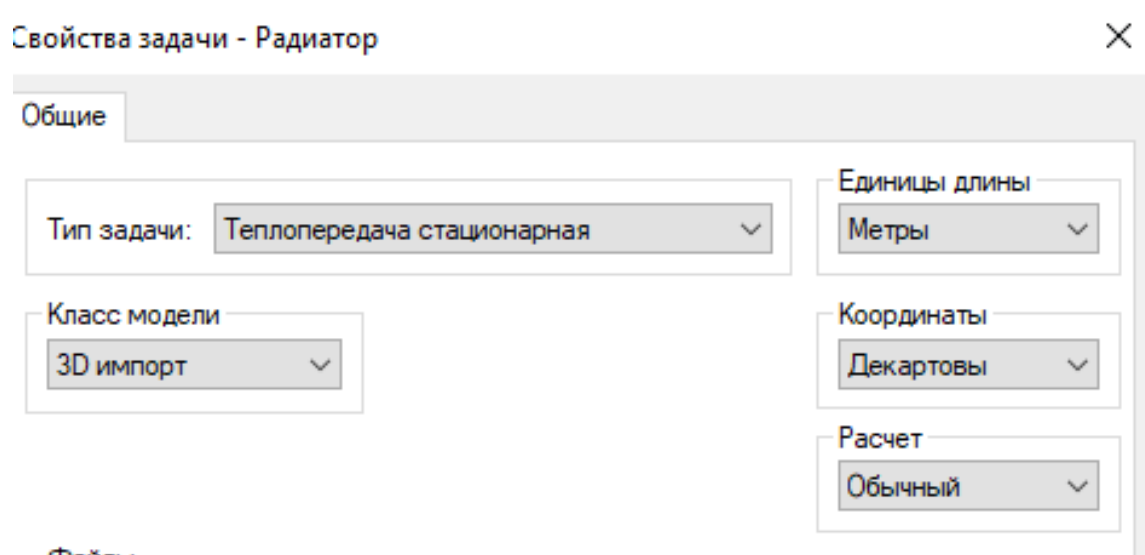
Интегральных результатов для 3D моделей поменьше чем для 2D. Можно рассчитать суммарный тепловой поток (Вт) для выбранных граней и среднюю температуру (°C). Одновременно отображается число выбранных граней и их площадь (см. рис.)

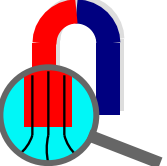
Значение интегрального теплового потока можно использовать также для оценки точности расчета, поскольку в идеальном случае выходящий тепловой поток должен быть равен входящему. В данном примере входящий тепловой поток равняется **65.7 Вт**, выходящий – **66.9 Вт**. Таким образом точность примерно **1.8%**.



Импорт модели в формате STEP

ELCUT может импортировать модель в формате STEP после создания задачи с указанием класса модели 3D импорт. Чтобы непосредственно импортировать файл выберите пункт Правка -> Геометрическая модель. Появится пункт Правка -> Импорт STEP
Экспорт формата STEP является функцией многих CAD систем – Solid Works, FreeCAD, Inventor и многих других. Причем FreeCAD распространяется бесплатно.





Граничные условия

Также проблема заключается в задании подходящих коэффициентов естественной конвекции. При повышенных температурах возможно потребуется уточнение стандартного коэффициента теплопередачи из СП $\alpha = 8.7 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{С}$. Это значение включает конвекцию и радиацию. На сайте elcut.ru есть доступ к скрипту, который рассчитывает α_k для различных температур, форм и ориентации поверхностей. Выбираем вид поверхности, основной размер и температуры. Нажимаем на кнопку **Рассчитать**.

Вид поверхности:

Высота пластины $L =$ м

Температура поверхности $T_w =$ $^\circ\text{С}$

Температура охлаждающей среды $T_\infty =$ $^\circ\text{С}$

Охлаждающая среда

Коэффициент конвекции $h =$ $\text{Вт/К}^*\text{м}^2$

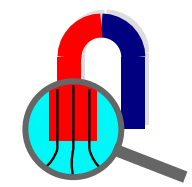
[Показать промежуточные результаты](#)

Поскольку данный скрипт учитывает только конвекцию, то надо добавить в граничных условиях теплопередачу посредством радиационного теплообмена. В 3D расчетах отсутствует отдельное поле для задания условий радиационного теплообмена (в 2D оно есть). Поэтому надо отдельно рассчитать α_L . Точный расчет довольно сложен. Одной из формул, позволяющих приближенно оценить α_L является следующая:

$$\alpha_L = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \frac{\left(\frac{t_1+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2+273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}$$

Вторая дробь называется температурным коэффициентом, C_1 , C_2 - коэффициенты излучения соответственно для стали и внутренних поверхностей помещения, 3.95 и 5.23, C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, 5.77

По таблице из книги К. Ф. Фокина, если $t_1 = 40^\circ\text{С}$, а $t_2 = 20^\circ\text{С}$, то температурный коэффициент равен 1,11
В целом $\alpha_L = 4.1 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{С}$. Сумма $\alpha_k + \alpha_L = 3.8 + 4.1 = 7.9 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{С}$

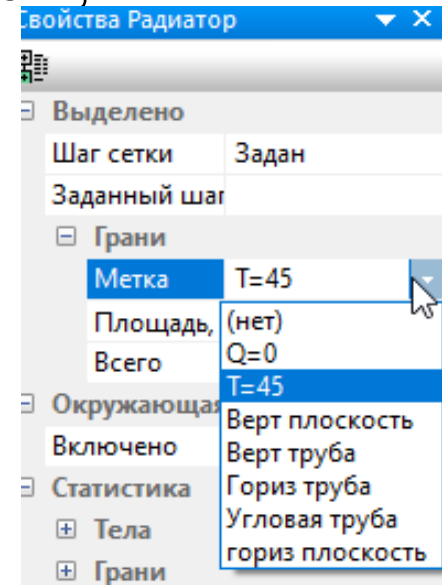
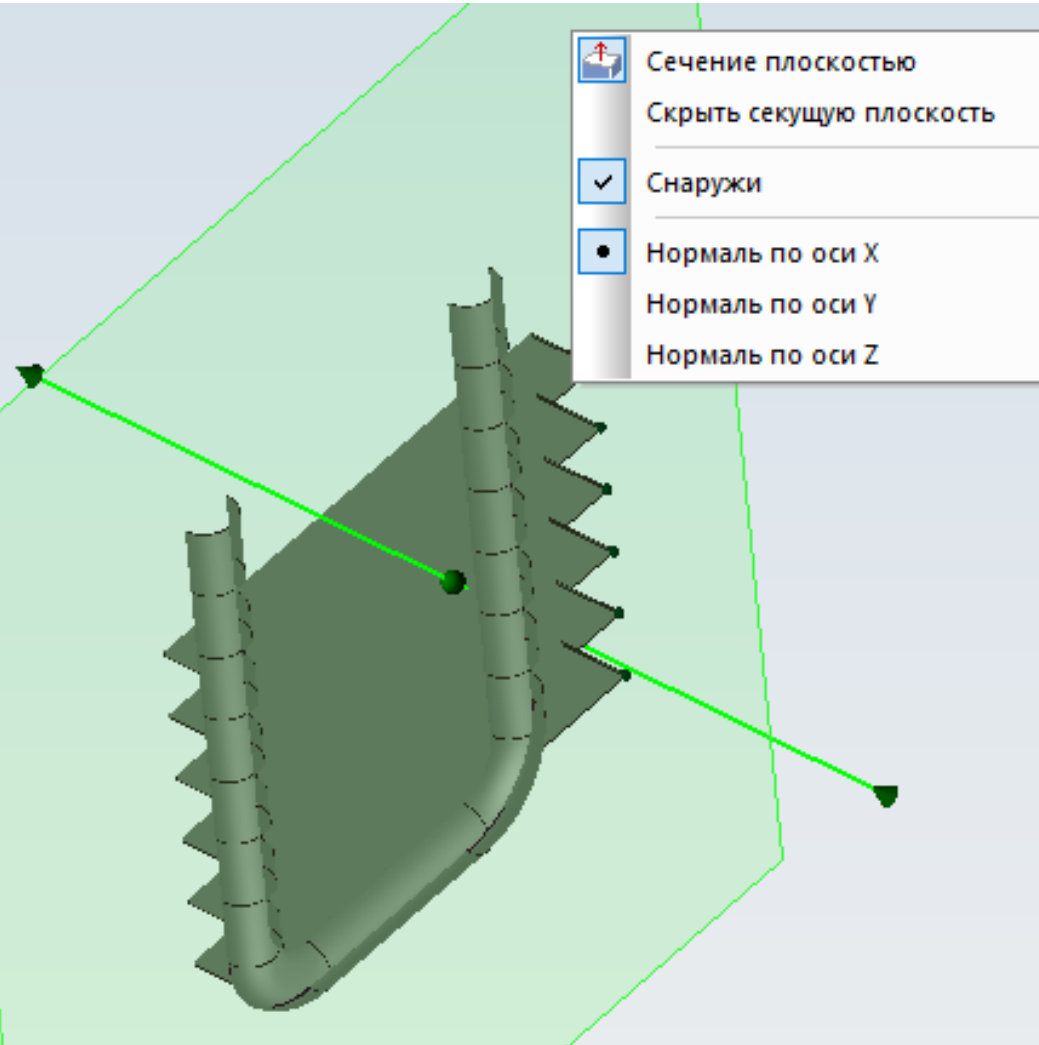


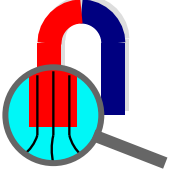
Задание граничных условий скрытым поверхностям

В ELCUT имеется еще один инструмент для назначения граничных условий внутренним поверхностям. Этот инструмент называется **Сечение плоскостью**. В данном случае он используется для задания граничных условий внутренней поверхности труб.

Выбираем этот инструмент, определяем направление нормали к плоскости (X, Y, Z) и с помощью мышки фиксируем положение секущей плоскости. Далее отключаем отображение секущей плоскости, чтобы она не мешала, и щелкая по поверхности, назначаем граничное условие.

Можно выбрать несколько поверхностей с одним и тем же граничным условием с помощью клавиши Ctrl и затем задать метку или наоборот указанием метки выбрать несколько поверхностей.





Расчет приведенного сопротивления теплопередаче по СП 230.1325800.2015

$$R_0^{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{R_0^{\text{усл}}} + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k} = \frac{1}{\sum a_i U_i + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k}$$

l_j, n_k - геометрические характеристики элементов;

Ψ_j, χ_k - удельные потери теплоты соответственно на линейных и точечных элементах;

$$\Psi_j = \frac{\Delta Q_j^L}{t_B - t_H} \quad \Delta Q_j^L - \text{дополнительные потери тепла на линейном } j\text{-ом элементе,}$$

приходящиеся на 1 погонный метр линейного элемента, Вт/м

t_B, t_H - температура воздуха внутри и снаружи, °С;

$$l_j = \frac{L_j}{\sum A_i} \quad L_j - \text{суммарная длина } j\text{-го элемента в м;}$$

$\sum A_i$ - суммарная площадь теплозащитной оболочки

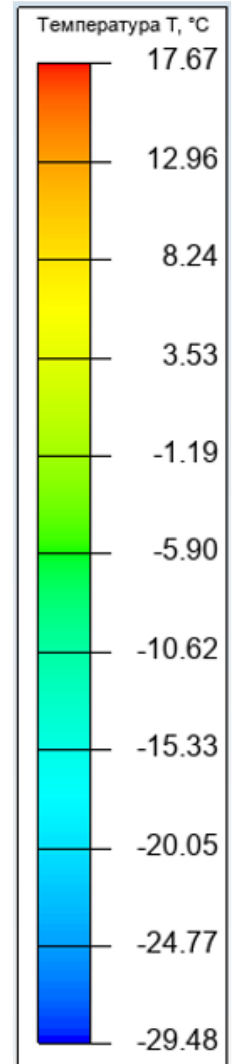
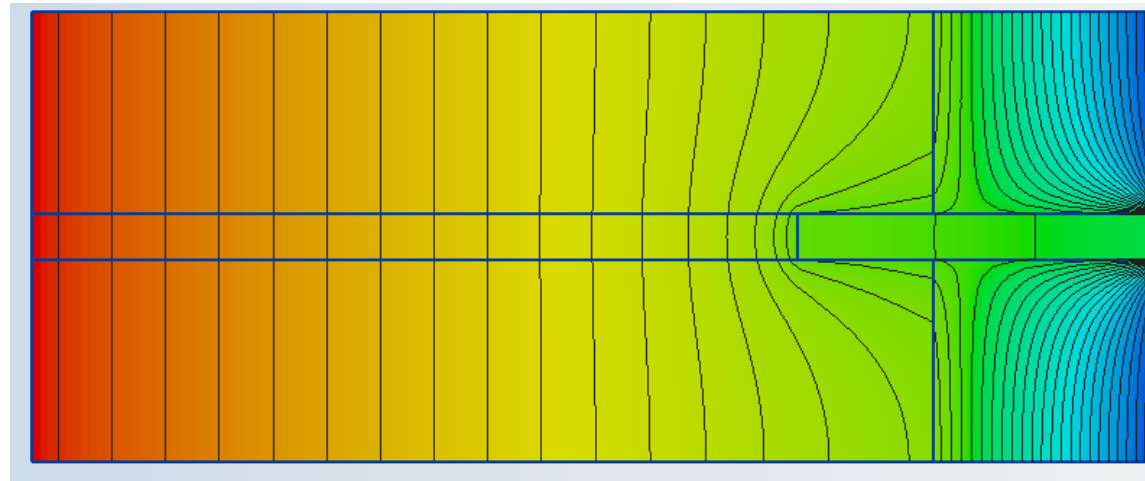
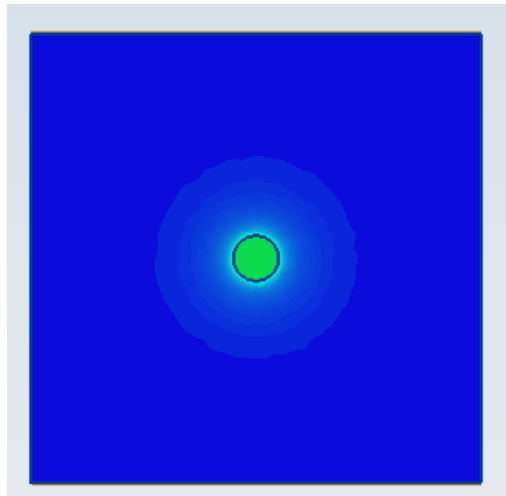
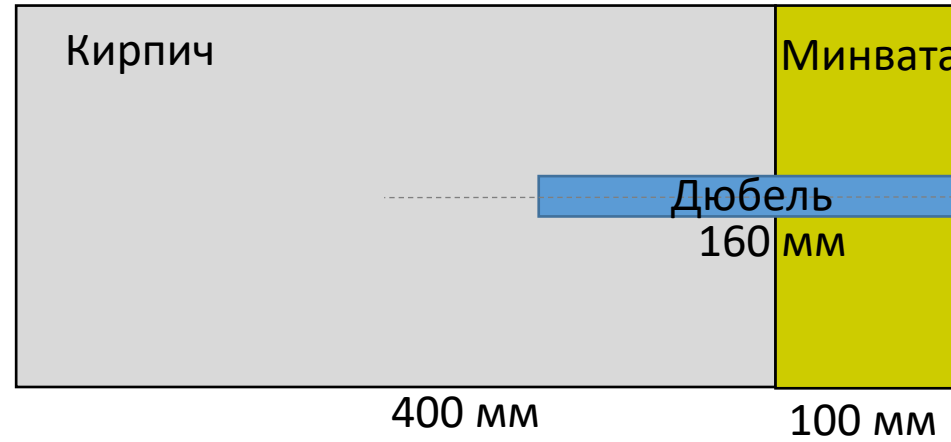
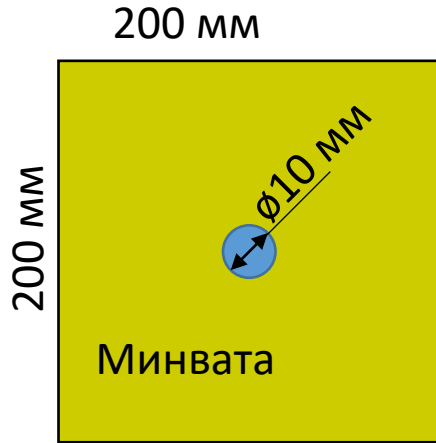
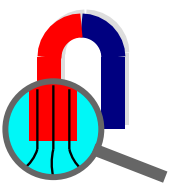
U_i - удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида;

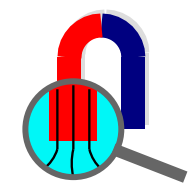
$$U_i = \frac{1}{R_i^{\text{усл}}}$$

a_i - площадь плоского элемента конструкции i -го вида, приходящаяся на 1 кв. метр теплозащитной оболочки

$$a_i = \frac{A_i}{\sum A_i}$$

Расчет n_k и χ_k на примере точечной теплотехнической неоднородности “Дюбель”





Расчет n_k и χ_k на примере точечной теплотехнической неоднородности “Дюбель”

$$\lambda_k = 0.40 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C} \quad \lambda_{\text{МИН}} = 0.04 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C} \quad \lambda_{\text{СТАЛИ}} = 50 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C} \quad \alpha_H = 23 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \alpha_B = 8.7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_B = 20^\circ\text{C} \quad t_H = -30^\circ\text{C} \quad \delta_k = 0.4 \text{ м} \quad \delta_{\text{МИН}} = 0.1 \text{ м} \quad R_{\text{УСЛ}} = \frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{\text{МИН}}}{\lambda_{\text{МИН}}} = 3.66 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расход дюбелей на 1 кв. м составляет 5 штук. Таким образом $n_k = 5$

Определим дополнительный тепловой поток ΔQ связанный с наличием дюбелей

Программа ELCUT дает значение теплового потока для участка стены размером 200 мм x 200 мм с дюбелем 0.81 Вт. Для однородной двухслойной стены без дюбеля той же площади.

$$Q_{\text{УСЛ}} = \frac{t_B - t_H}{R_{\text{УСЛ}}} * S \quad Q_{\text{УСЛ}} = \frac{20+30}{3.659} * 0.04 = 0.547 \text{ Вт} \quad \Delta Q = 0.81 - 0.547 = 0.263 \text{ Вт}$$

Определим удельные дополнительные тепловые потери $\chi_k = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{0.263}{50} = 0.00526$

$$R^{\text{прив}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{УСЛ}}} * 1 + n_k * \chi_k} = \frac{1}{0.273 + 0.0263} = \frac{1}{0.3} = 3.33$$