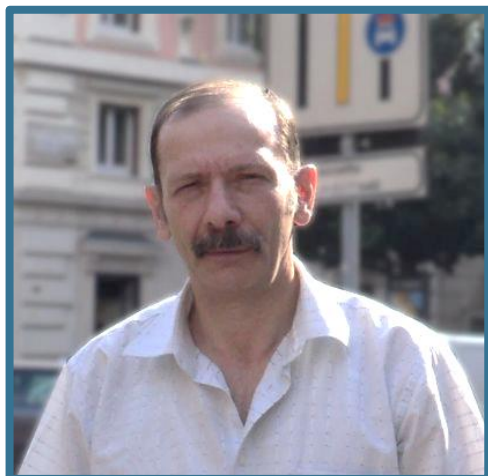




# Использование отечественной программы ELCUT для теплотехнических расчетов ограждающих конструкций



**Рухтер Александр Дантонович**

Директор ООО «Хайтек»,  
+7-902 331 0949, [support@haitek.ru](mailto:support@haitek.ru)

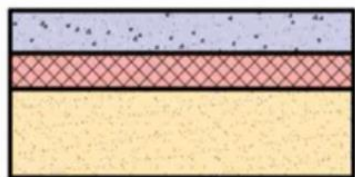


## Расчеты ограждающих конструкций по МКЭ

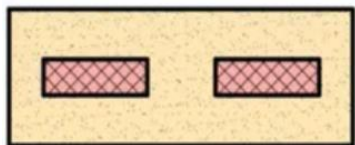
### Виды теплотехнических неоднородностей



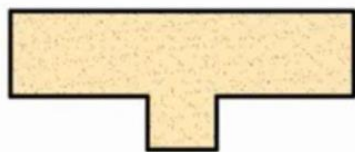
Однородная однослойная конструкция



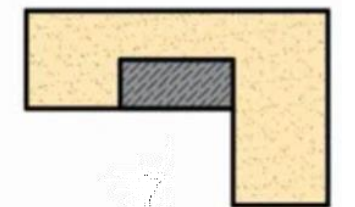
Однородная многослойная конструкция



Теплопроводное включение



Геометрически неоднородная конструкция



Смешанная конструкция

Однородные конструкции не требуют расчета по МКЭ. Расчет приведенного сопротивления  $R_{пр}$  и плотности теплового потока  $q$  производится по простой формуле:

$$R_{пр} = \frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta}{\lambda}$$
$$q = \Delta t / R_{пр}$$

Расчет по МКЭ необходим при наличии теплотехнической неоднородности, связанной с геометрией или свойствами материалов. В реальных строительных конструкциях такие теплотехнические неоднородности возникают в зоне углов стен, примыкания балконных плит, откосов окон, размещения термовкладышей, и.т.д.



## Требования СП 50.13330.2012

1. Санитарно-гигиенические требования:

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

$t_{\text{тр}}$  удобно брать из СП 23.101.2004 “Тепловая защита” в зависимости от относительной влажности и температуры воздуха помещения.

2. Требования теплозащиты (поэлементные требования)

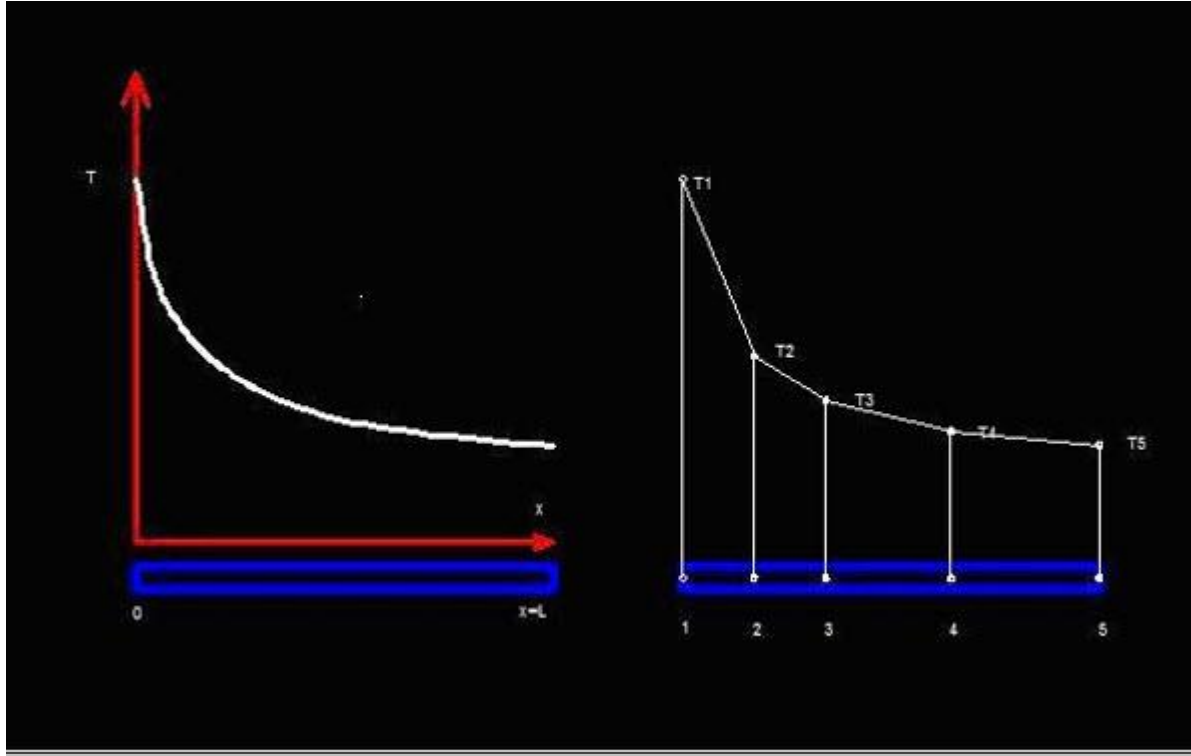
$$R_{\text{пр}} \geq R_{\text{норм}} \left[ \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}} \right]$$

$R_{\text{норм}}$  определяется СП 50.13330.2012

Программа ELCUT позволяет проверить соответствие конструкции 1-ому и 2-ому требованию СП. 3-е комплексное требование, нормирующее удельные теплотери на ( куб. м \*°C) , связано с расчетами по МКЭ в меньшей степени.

Т воздуха внутри, °C	Температура точки росы при различной влажности в °C		
	50%	55%	60%
18	7.44	8.83	10.12
19	8.36	9.76	11.06
20	9.28	10.69	12.0
21	10.2	11.62	12.94

## Суть метода конечных элементов (МКЭ)



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

Вычисление узловых значений  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  основано на минимизации некоего функционала, определяемой физической сущностью задачи (статика, теплопроводность, и.т.д.), а также граничными условиями.

Таким образом МКЭ является численным методом решения дифференциальных уравнений математической физики, получающим приближенный результат за счет решения системы линейных алгебраических уравнений большой размерности.



## 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.



## Переход от реальной конструкции к модели

Создание модели является наиболее сложной и творческой работой, включающей решение следующих вопросов.

1. Определяем размерность задачи (1D, 2D или 3D). Если тепловой поток преимущественно распространяется вдоль линии, то выбираем размерность 1D. Если изменение величины и направления происходит в плоскости, то выбираем 2D. В противном случае расчетная модель будет 3D.
2. Внимательно отнеситесь к включению в модель материалов, обладающих высокой теплопроводностью (металлы). Они могут даже при маленькой площади сечения оказать большое влияние на результат.
3. Упростите геометрию. Сплайны и эллипсы замените отрезками или дугами (требование ELCUT).
4. На границах модели и окружающего пространства должны быть известны граничные условия. В стандартных задачах строительной теплотехники эти условия определены СП. Для внешней границы  $\alpha = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ , а температуру берем из СП по климатологии. Для внутренней -  $\alpha = 8.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ , а температура по нормам СанПиН. Очень часто используется граничное условие  $q = 0$ . Значение коэффициента теплопередачи  $\alpha = 8.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$  или  $8.0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$  для окон учитывает общий перенос тепла конвекцией и излучением.



## Переход от реальной конструкции к модели (продолжение)

5. Необходимо учитывать симметрию геометрии и граничных условий, которая позволяет моделировать только половину или четверть конструкции, поскольку в направлении перпендикулярном плоскости симметрии можно применить граничное условие  $q = 0$
6. Каждая область должна быть замкнута и ей должна быть присвоена метка материала.
7. Каждому внешнему ребру в случае 2D модели или внешней поверхности в случае 3D модели должна быть присвоена метка граничных условий.
8. Если не удастся найти достаточно точное значение какого-либо физического параметра, то выполните расчет для минимального и максимального значения. В этом плане программа ELCUT предоставляет дополнительное удобство, которое заключается в том, что одно задание на расчет может включать несколько вариантов конструкции, отличающихся по какому-то параметру. Потом при анализе результатов расчета легко будет понять, насколько сильно влияет разброс значений физического параметра.



## Программный комплекс ELCUT

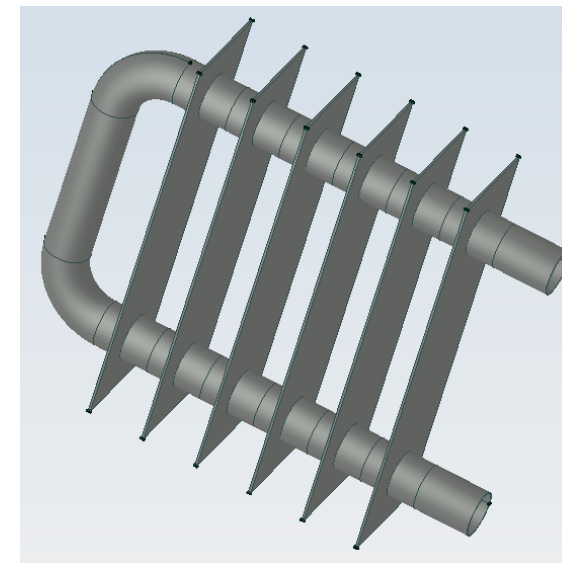
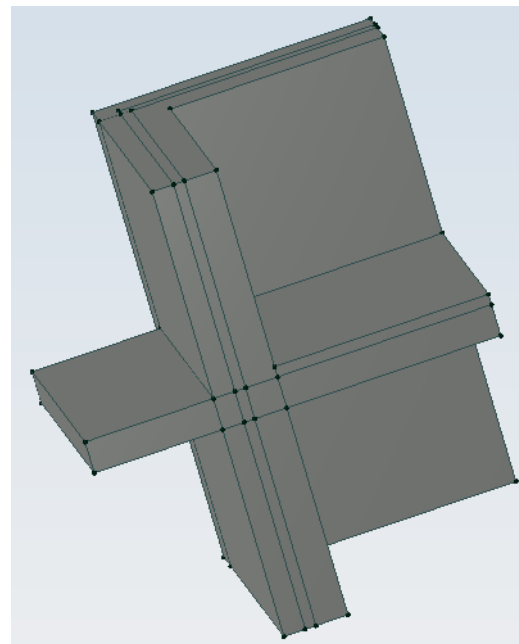
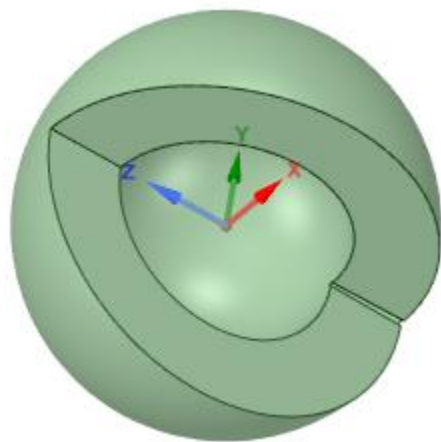
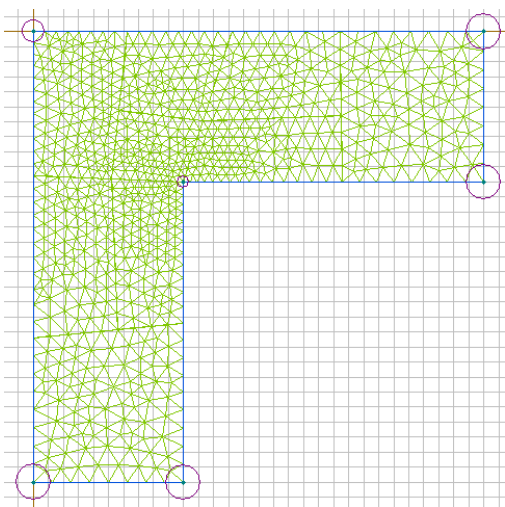
<b>Набор для магнитных расчётов</b>	
Магнитные задачи	Магнитостатика
	Магнитное поле переменных токов
	Нестационарное магнитное поле
<b>Набор для электрических расчётов</b>	
Электрические задачи	Электростатика и электрическое поле постоянных токов
	Электрическое поле переменных токов
	Нестационарное электрическое поле
<b>Набор для тепловых и механических расчётов</b>	
Тепловые и механические задачи	Стационарная теплопередача
	Нестационарная теплопередача
	Анализ упругих деформаций





## Геометрия моделей в теплотехнических расчетах ELCUT

1. Плоская геометрия
2. Осесимметричная геометрия
3. Объемная геометрия, полученная вытягиванием в графическом редакторе ELCUT
4. Произвольная объемная геометрия, импортируемая в ELCUT через формат STEP





# Графический редактор

## 1. Настройка сетки.

Сетка привязки

Привязать к сетке  Показать сетку

Шаги

По горизонтали:  (мм)

По вертикали:  (мм)

Не квадратные ячейки

Масштабировать вместе с окном

Позиция начальной точки

Горизонтальная:  (мм)

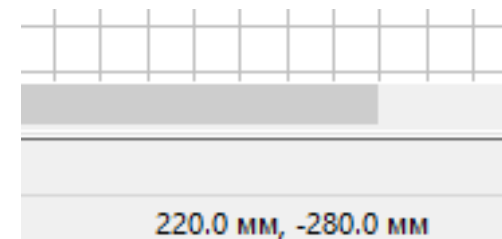
Вертикальная:  (мм)

OK

Отмена

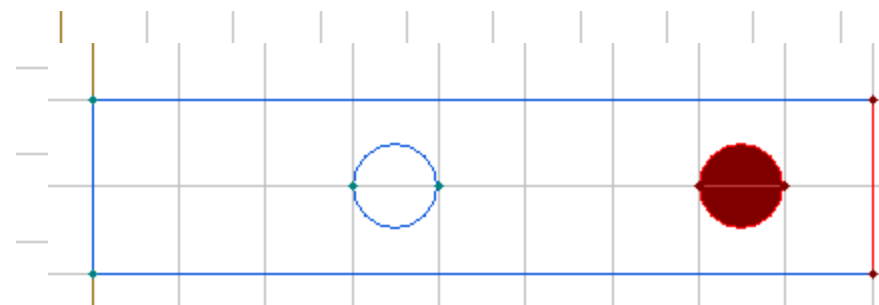
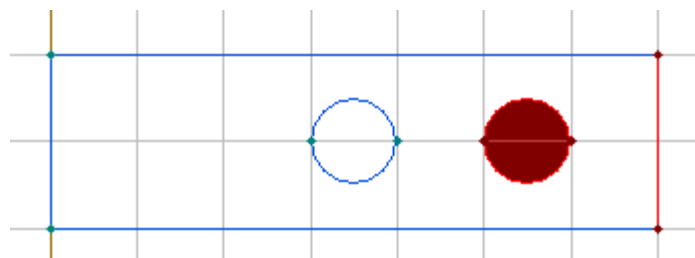
- Масштабировать вместе с окном
- Шаг по горизонтали и вертикали
- Привязать к сетке
- Показать сетку
- Позиция начальной точки

## 2. Координаты курсора



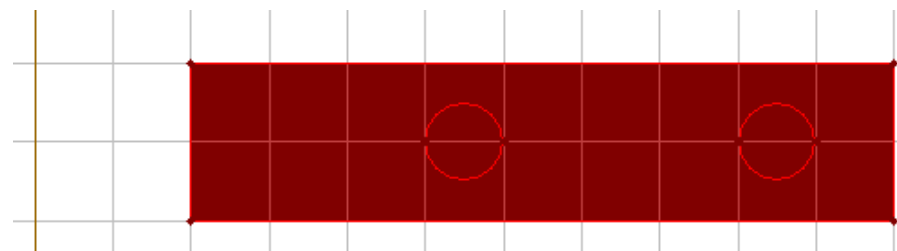
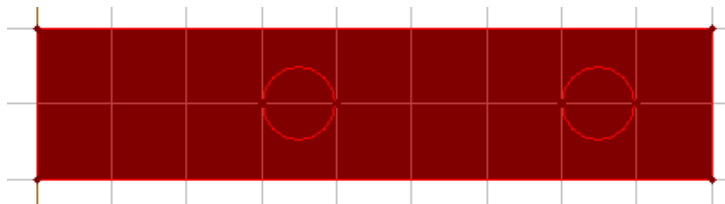
Координаты курсора мыши отображаются в строке состояния  
Доступны декартовы и полярные координаты  
Единицы измерения можно изменить

## Растяжение

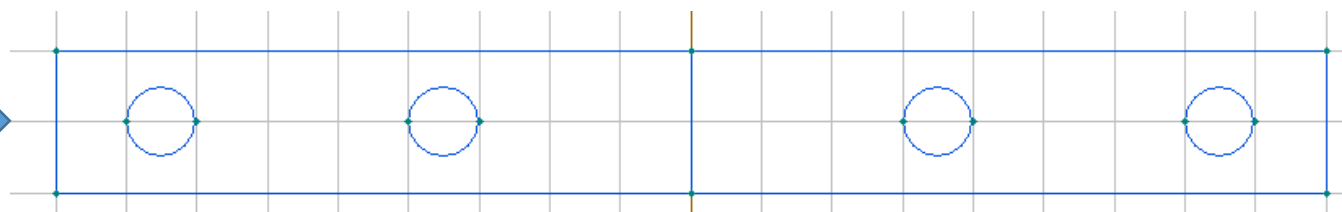
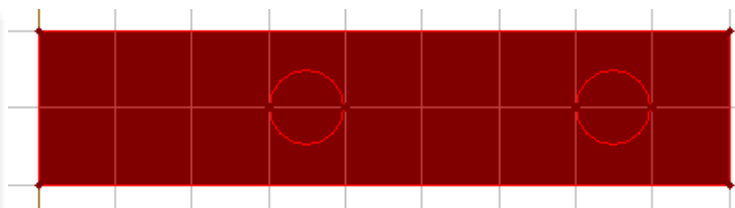




Перенос

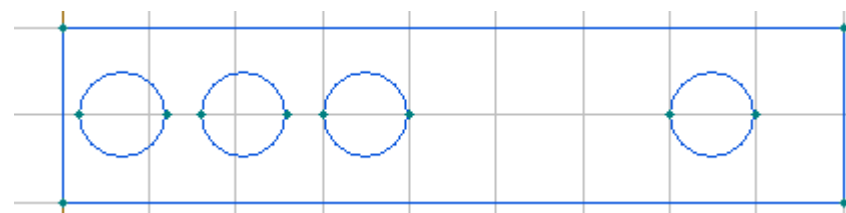
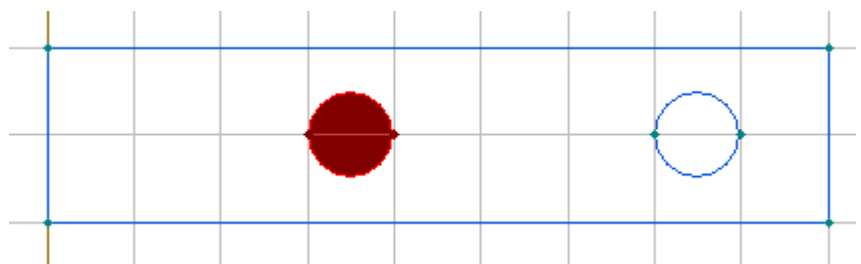


Зеркальное копирование\*



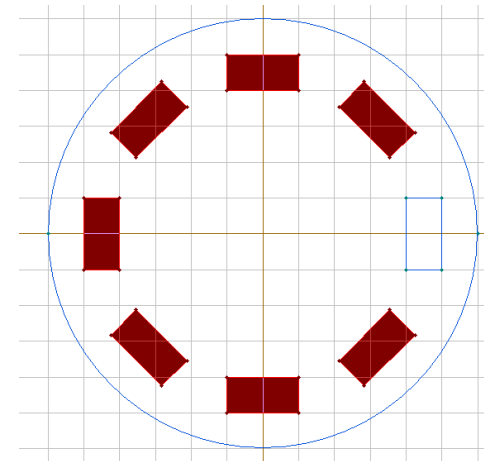
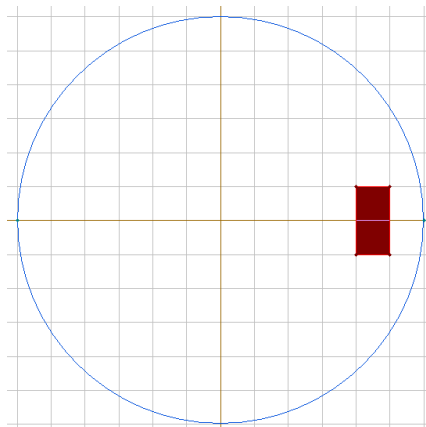
\*Копирование относительно оси, проходящей через заданную точку под заданным углом к оси абсцисс

Копирование с переносом

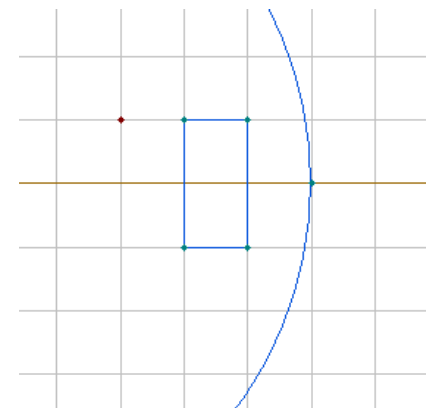
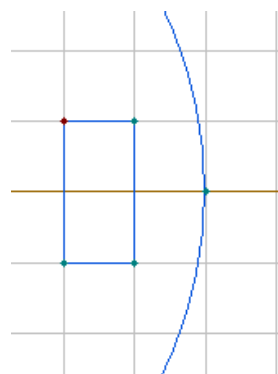




## Копирование с поворотом



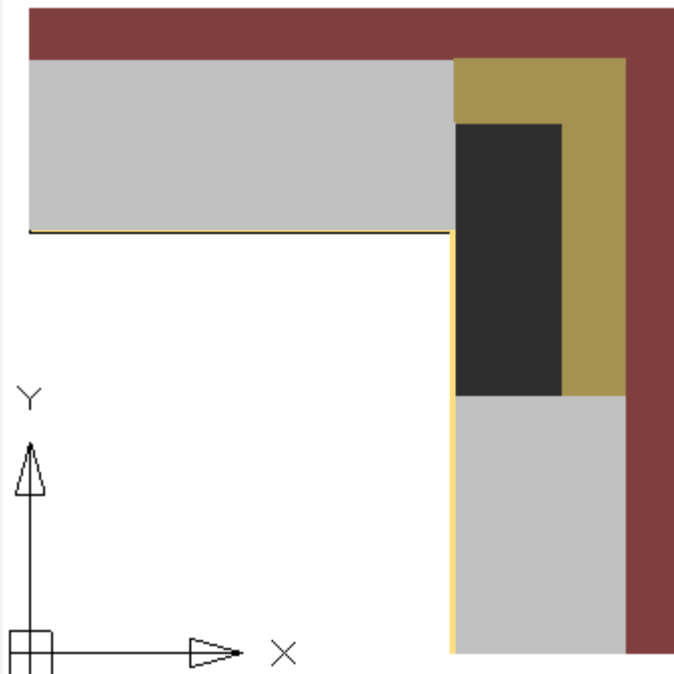
## Ввод точки на заданном расстоянии от выделенной





## Импорт <-> экспорт DXF

В графическом редакторе самого ELCUT можно создать достаточно сложную 2D геометрию, но чтобы сэкономить время и распределить работу между проектировщиками и расчетчиками, целесообразно импортировать уже имеющуюся геометрию через наиболее распространенный формат DXF. ELCUT поддерживает также экспорт модели в формате DXF в любую CAD-систему.



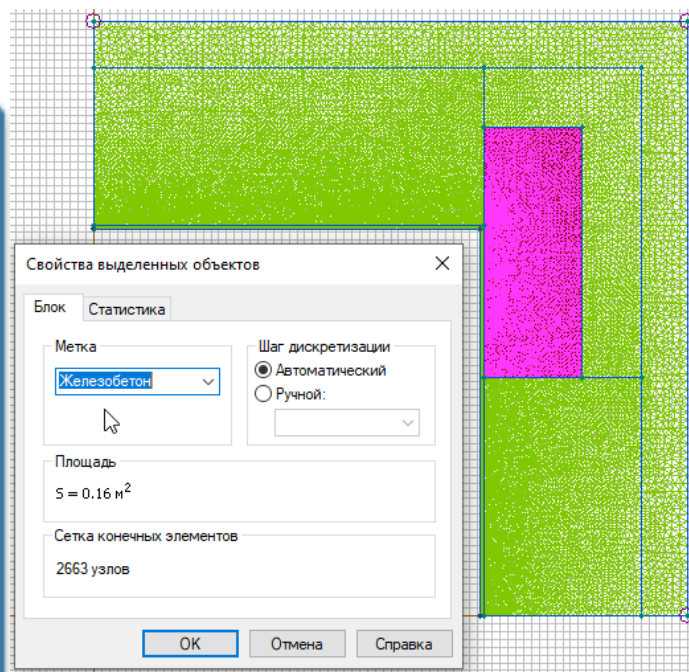
Файл DXF должен отвечать следующим условиям:

1. Для описания геометрии модели используются только отрезки и дуги.
2. Тип линии только Continuous
3. Координаты точек не должны быть слишком большими. Например, 1000000 единиц. По возможности чертеж модели должен располагаться ближе к началу координат. Иначе происходит искажение геометрии.

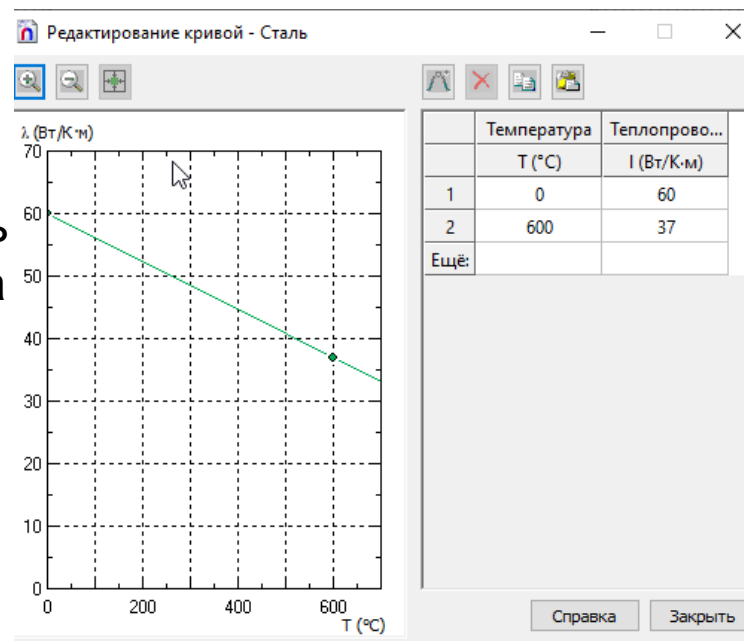


## Задание свойств материалов

Каждому типу материала в ELCUT соответствует метка (наименование) материала с соответствующими теплотехническими параметрами. Для проведения стационарных расчетов достаточно ввести значение теплопроводности, для нестационарных – дополнительно теплоемкость и плотность. Удобно сначала создать метки, а потом их назначать областям.



Выбор области и назначение метки производится очень быстро путем клика мышкой внутри области.



ELCUT поддерживает удобное задание различной значений теплопроводности в направлении осей X и Y (ортотропию), а также зависимость теплопроводности и теплоемкости материала от температуры.

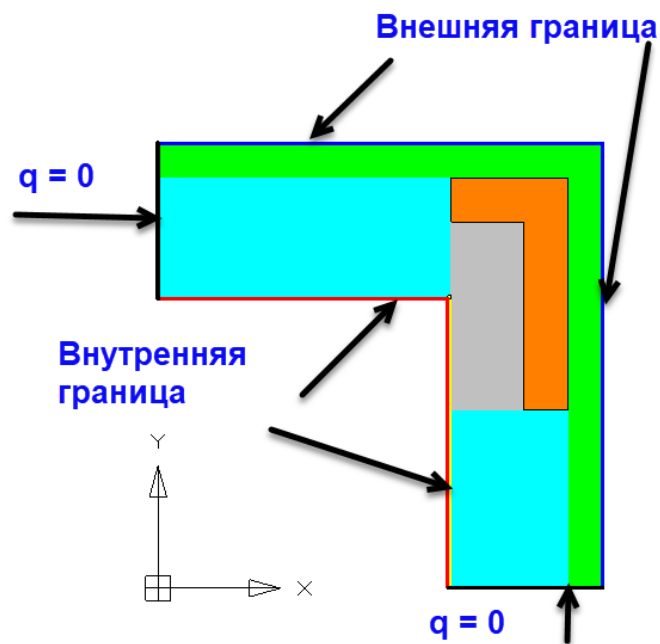
## Подключение библиотеки материалов

Обычно в каждом узле проектировщик применяет одни и те же материалы. В таком случае целесообразно при создании новой задачи подключать справочник свойств, настроенный для конкретной организации.



## Присвоение внешним ребрам модели меток граничных условий

Всем внешним ребрам модели надо назначить граничные условия. Аналогично меткам материалов предварительно создаются метки граничных условий. Для внешних и внутренних поверхностей обычно задаются нормативные значения коэффициента теплопередачи  $\alpha$  и температуры воздуха  $T$ . Температура воздуха берется из СП по климатологии.



Очень часто модель представляет собой теплотехническую неоднородность, переходящую в однородную конструкцию. На внешней границе однородной части модели (см. рис.) плотность теплового потока равна нулю. Это условие действует по умолчанию и не требует задания.

### Граничные условия для нестационарных задач

В нестационарных задачах граничные условия зависят от времени.

ELCUT позволяет задать зависимость температуры, теплового потока и коэффициента теплопередачи от времени при задании граничных условий посредством встроенных функций и знаков математических операций.

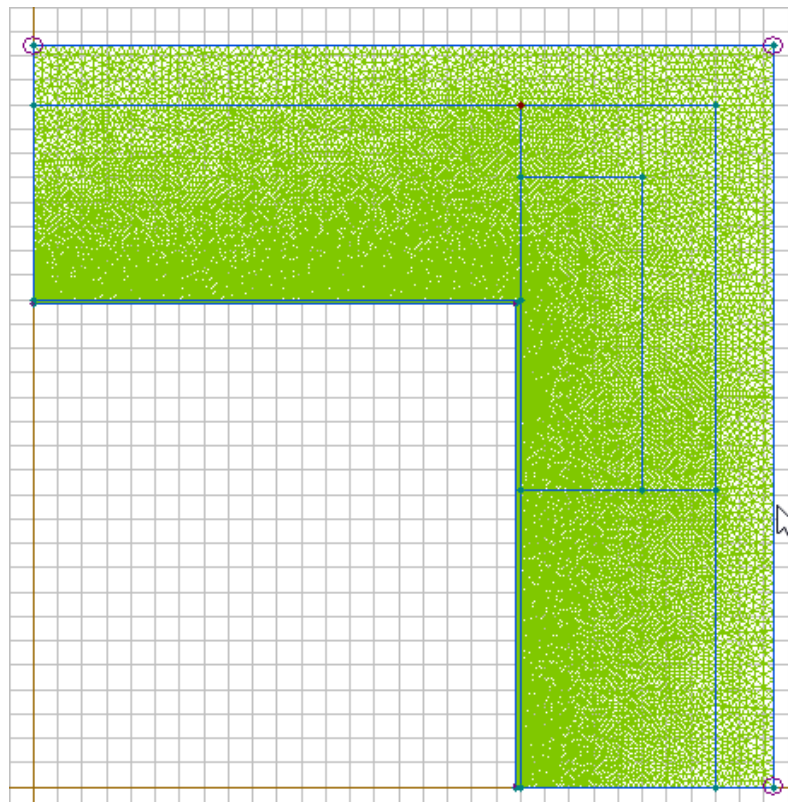
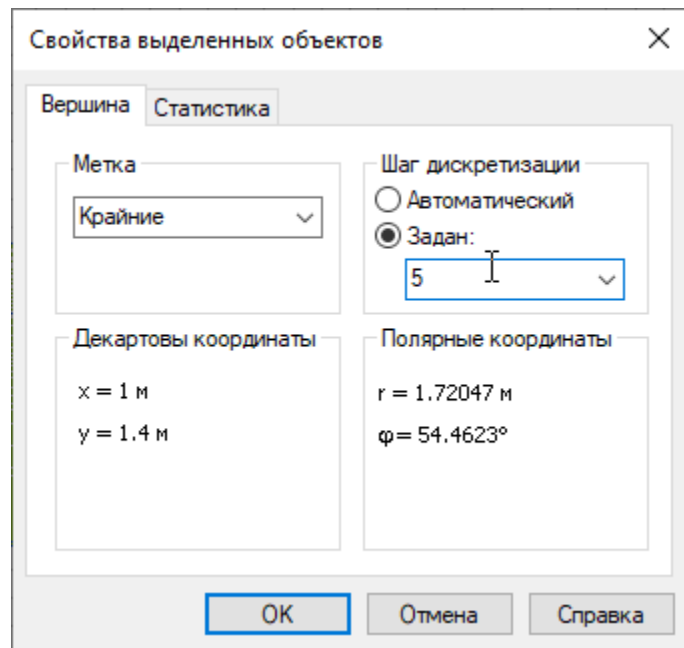


## Автоматическое разбиение модели на элементы

ELCUT включает средства для автоматического создания сетки элементов. 2D модели разбиваются на треугольные элементы, 3D модели на тетрадры.

Густотой сетки можно управлять, задавая различный шаг дискретизации 3D объектам, областям, ребрам и вершинам модели.

Сведения о шаге дискретизации вносятся в описание соответствующей метки. В дальнейшем выбор метки будет сразу задавать шаг.

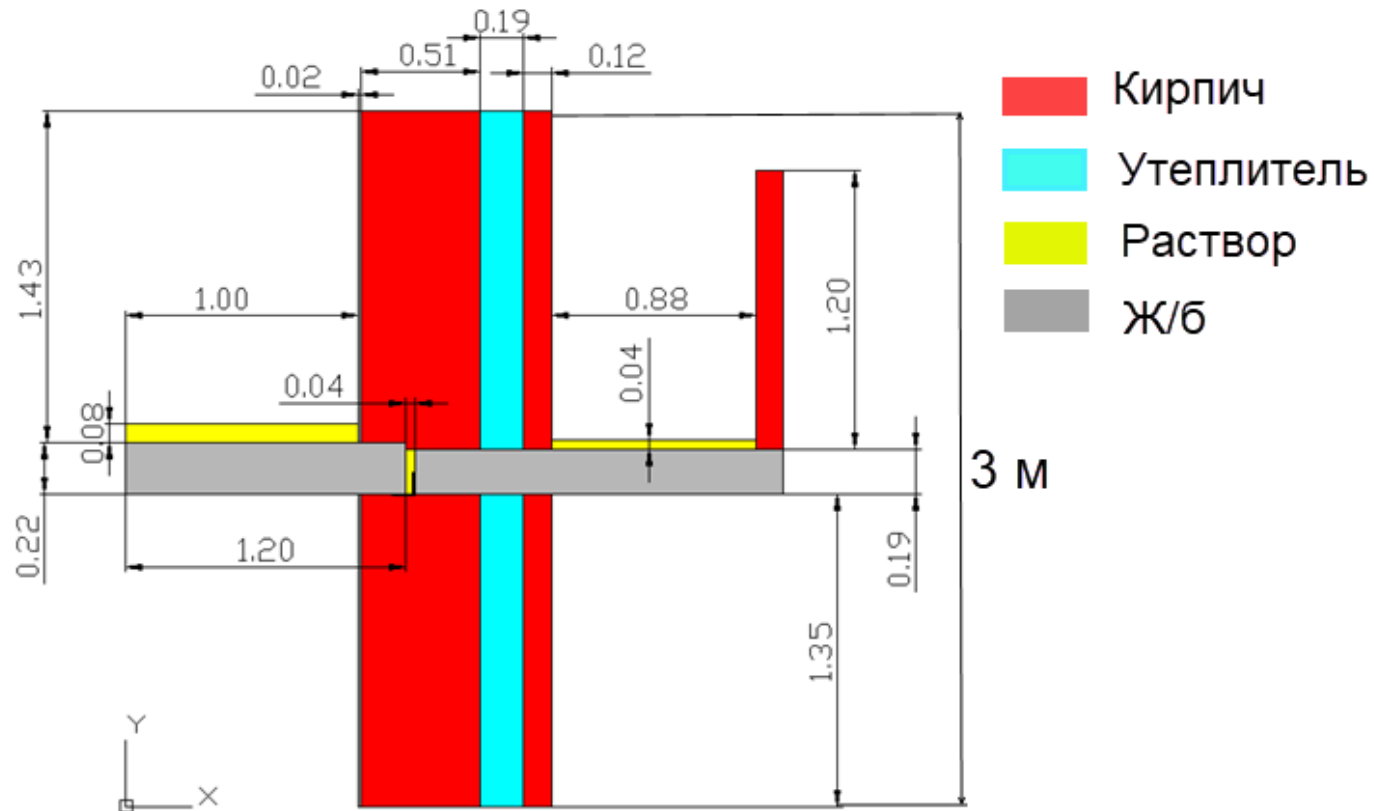


Геометрическая модель отображает окружности вокруг вершин с заданным шагом дискретизации. Диаметр окружности пропорционален шагу дискретизации.





## Расчет модели с примыканием балконной плиты из вебинара Д. Крайнова



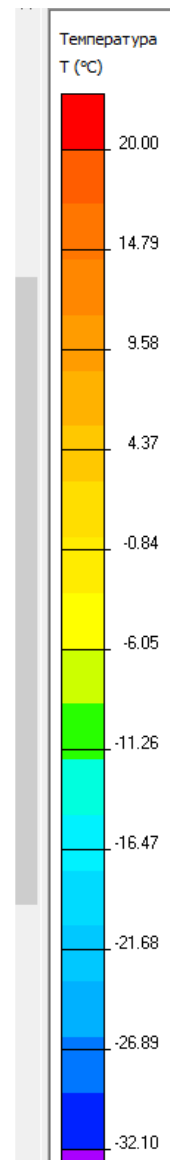
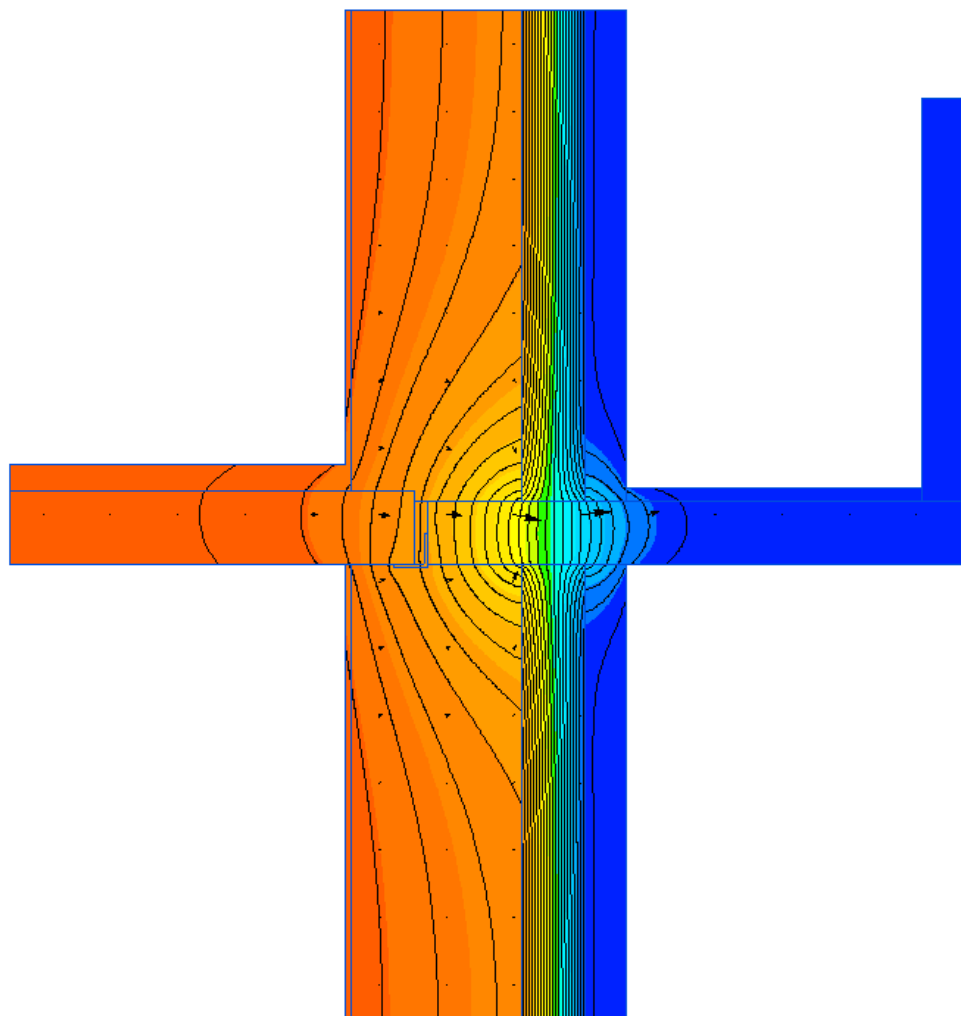
Материал	$\lambda$ , Вт/м*°С
Кирпич	0.87
Железобетон	2.04
Раствор	0.93
Утеплитель	0.041
Сталь	58

Допустим, здание находится в регионе, для которого по СП 131.13330.2020 средняя температура воздуха в самую холодную пятидневку зимнего периода равна  $-29^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент конвекции, учитывающий суммарный перенос тепла конвекцией и излучением, в соответствии с СП 50.13330.2012 равен для внутренней поверхности  $8.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ , для внешней -  $23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ .

Температура воздуха внутри помещения в соответствии с СанПин равна  $20^{\circ}\text{C}$ , влажность 55%



## Результаты расчета



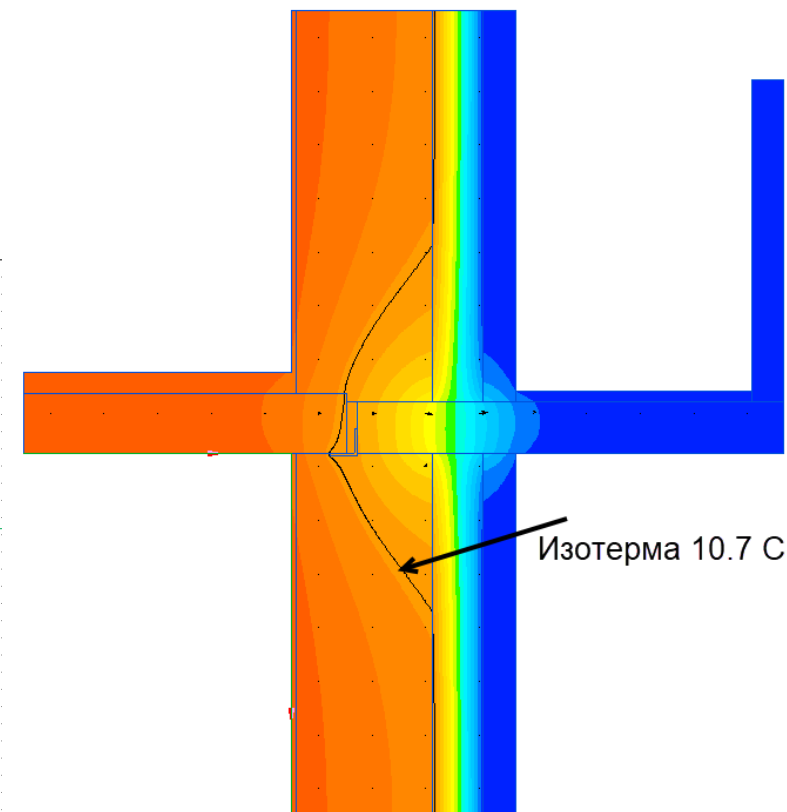
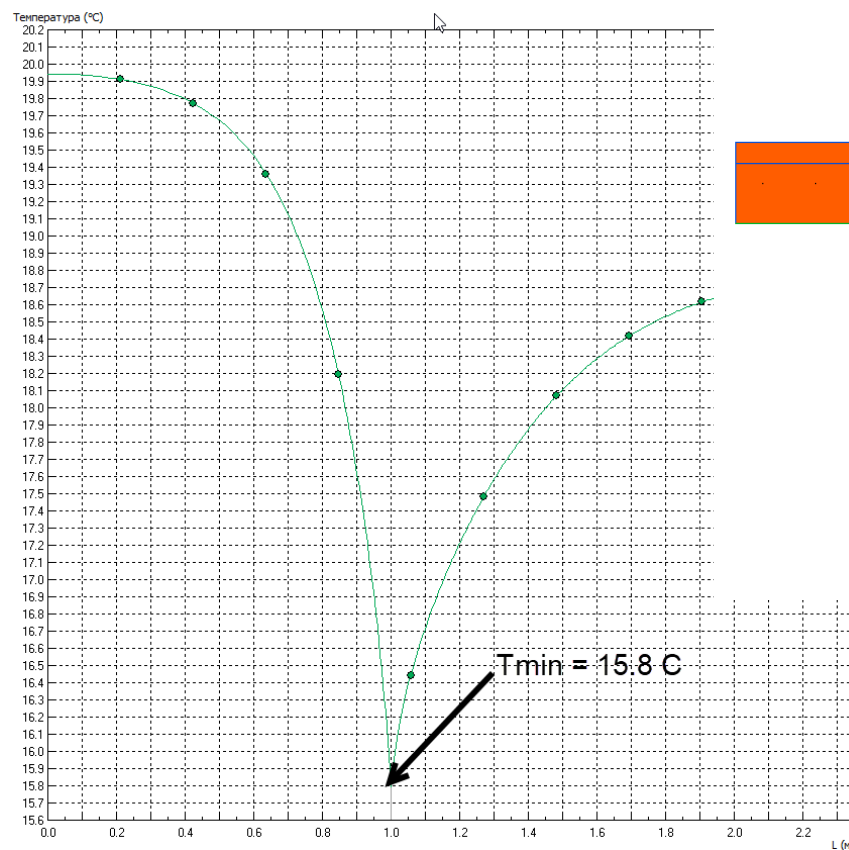
Результаты расчета приведены слева в виде температурного изополя с отображением векторов теплового потока и изотерм. Также можно отобразить изополе тепловых потоков или температурных градиентов. Дополнительно можно выводить значения температуры, теплового потока и градиентов в любой точке или интегральное значение теплового потока в ваттах по любому контуру, например, для всей внутренней поверхности.



## Анализ наличия конденсации влаги

Конденсация будет иметь место, если температура поверхности помещения зимой будет ниже температуры точки росы. При температуре воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и влажности  $55\%$  ее значение равно  $10.7^{\circ}\text{C}$

Задавая опорное значение изотермы  $10.7^{\circ}\text{C}$  и очень большой интервал, получаем изополе температур с единственной изотермой  $10.7^{\circ}\text{C}$ . Другим способом анализа является формирование графика температур по выбранному контуру. В качестве контура выбираю ребра, определяющие внутреннюю поверхность.





## Расчет приведенного сопротивления теплопередаче по СП 230.1325800.2015

$$R_{O}^{пр} = \frac{1}{\sum a_i U_i + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k} \quad [1]$$

Приведенное сопротивление теплопередаче обычно значительно меньше условного сопротивления теплопередачи элемента однородной ограждающей конструкции

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

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

$l_j$  - длина линейной теплотехнической неоднородности  $j$  - го вида, приходящаяся на 1 кв. метр теплозащитной оболочки  $l_j = \frac{L_j}{\sum A_i}$

$n_k$  - количество точечных теплотехнических неоднородностей  $k$  - го вида, приходящихся на 1 кв. метр теплозащитной оболочки

$$n_k = \frac{N_k}{\sum A_i}$$

$\Psi_j, \chi_k$  - удельные потери теплоты соответственно на линейных и точечных теплотехнических неоднородностях, приходящиеся на 1 кв. метр теплозащитной оболочки

$$\Psi_j = \frac{\Delta Q_j^L}{t_B - t_H}$$

$\Delta Q_j^L$  - дополнительные потери тепла на линейном  $j$ -ом элементе, приходящиеся на 1 погонный метр линейного элемента, Вт/м  $t_B, t_H$  - температуры внутреннего и наружного воздуха



## Расчет приведенного сопротивления теплопередачи с помощью ELCUT (из вебинара Д. Крайнова на сайте elcut.ru)

Допустим, необходимо определить приведенное сопротивление теплопередачи стены здания с общей площадью фасада 2468 м<sup>2</sup>, площадью окон и дверей 334 м<sup>2</sup>

На плане здания (см. рис) отмечаем все теплотехнические неоднородности стен: углы, примыкания стен, оконные откосы, примыкание балконов, крепление утеплителя дюбелями, и.т. д.

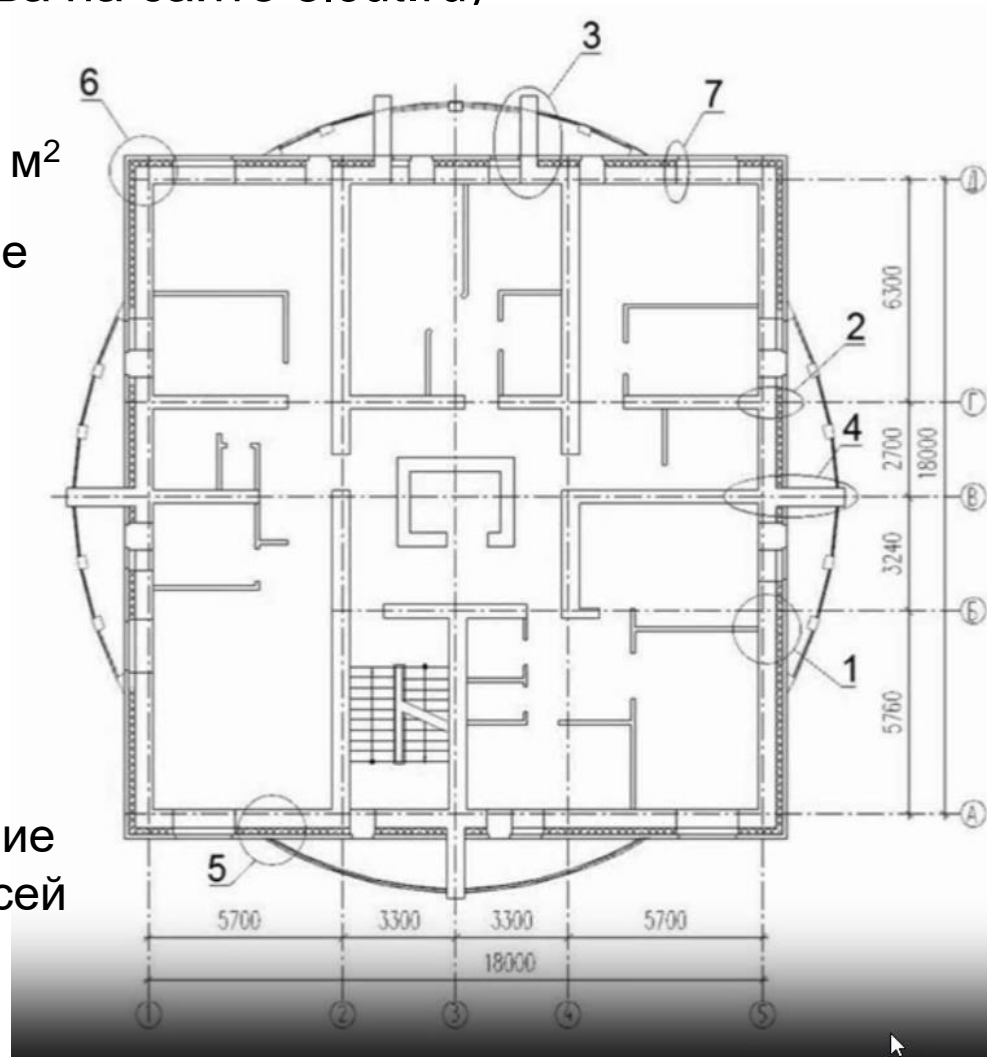
Определяем площадь стен, вычитая из площади фасада площадь окон и дверей 2468 – 334 = **2134 м<sup>2</sup>**

Условное сопротивление теплопередаче однородной конструкции стены вычисляется по формуле:

$$R_{o}^{усл} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{н}} \left[ \frac{м^2 \cdot \text{°C}}{Вт} \right] \quad [2]$$

К сожалению, невозможно сразу в ELCUT получить значение приведенного сопротивления теплопередачи сразу для всей стены. Необходимо для каждой теплотехнической неоднородности создавать свою КЭ модель и путем расчета вычислять коэффициенты формулы 1.

Поскольку конструкция узлов часто повторяется, то эти коэффициенты могут быть повторно использованы для расчетов других объектов.





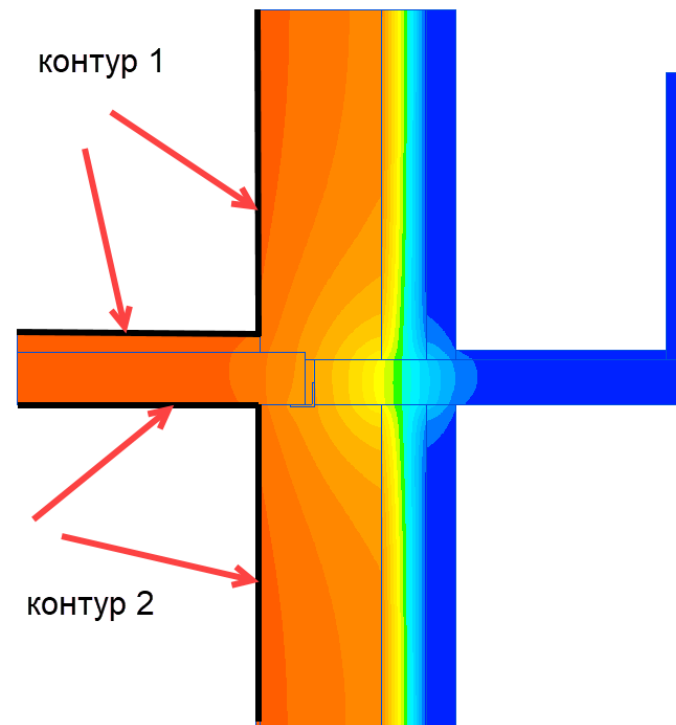
Рассмотрим расчет коэффициентов  $l_j$  и  $\Psi_j$  для теплотехнической неоднородности № 11, (примыкание балконной плиты).

Конструкция однородной стены состоит из 4-слоев (2 слоя кирпича, слой минваты и штукатурка). По формуле [2]  $R_0^{усл} = 5.53 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

Интегральный поток тепла через контур 1 и контур 2, полученный расчетом в ELCUT, равен 54.39 Вт, условный поток тепла через такую же площадь однородной стены по формуле  $Q = \frac{\Delta t \cdot S}{R_0^{усл}}$  ;

В данном случае  $\Delta t = 52 \text{ °C}$ ,  $S = 3 \text{ м}^2$ . Тогда  $Q = 28.2 \text{ Вт}$ ,  $\Delta Q = 54.39 - 28.2 = 26.19 \text{ Вт}$

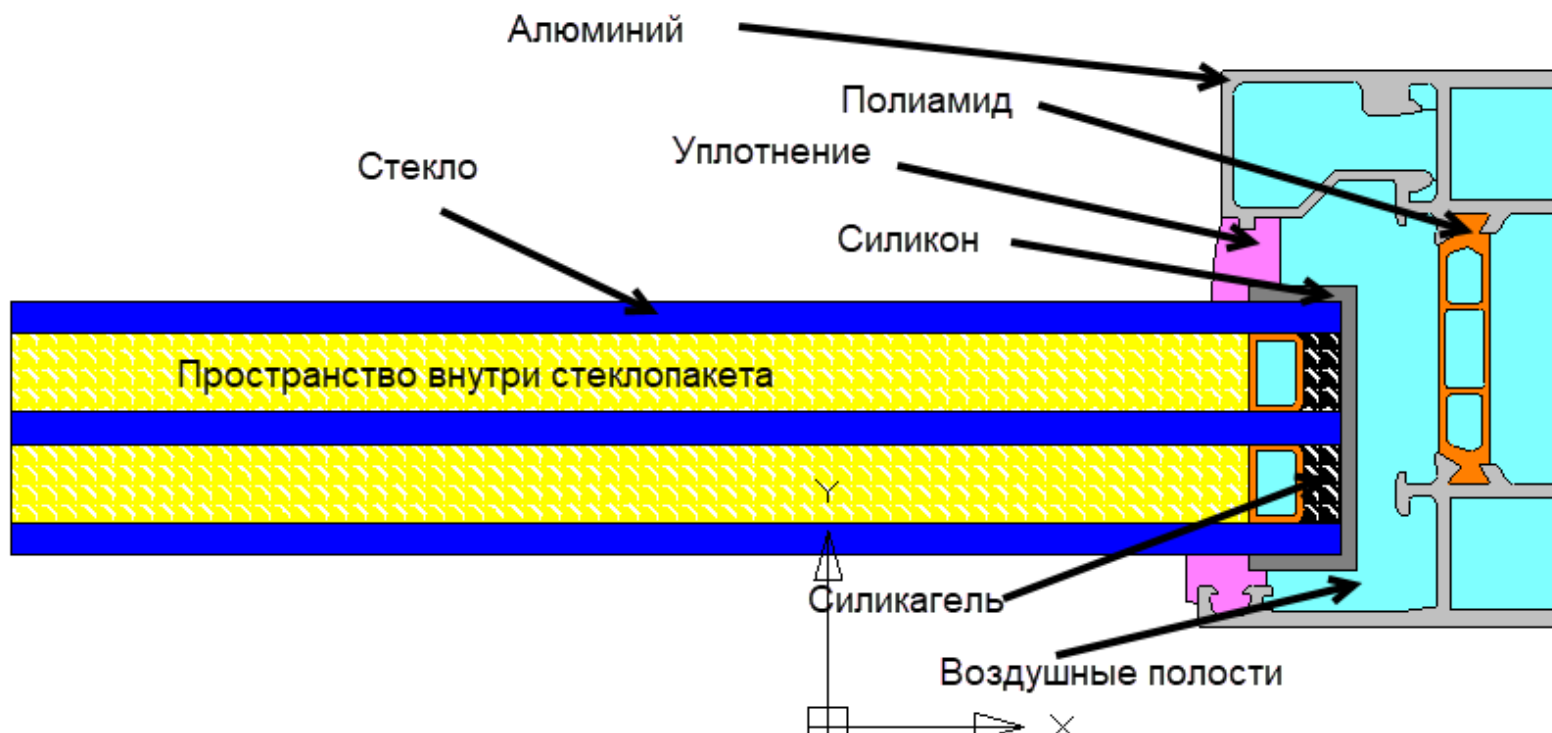
Параметр	Формула или описание	Значение
$\Delta t$	Разницы наружной и внутренней температуры, °C	52
A	Площадь стен здания, м <sup>2</sup>	2134
$L_{11}$	Общая горизонтальная длина балконных плит, м	407.6
$R_0^{усл}$	$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_н}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт	5.53
$\Delta Q_{11}$	Дополнительные потери тепла, Вт/м	26.19
$l_{11}$	Удельный геометрический показатель, $l_{11} = L_{11}/A$ , м/м <sup>2</sup>	0.191
$\psi_{11}$	Удельные потери теплоты, $\psi_{11} = \Delta Q / \Delta t$ , Вт/м·°C	0.504





## Расчет оконных конструкций

Оконные конструкции сложны для расчета теплопроводности в силу своей оптической прозрачности. У современных стеклопакетов теплопередача существенно зависит от длины волны инфракрасного излучения. Кроме того рама стеклопакета состоит из большого числа воздушных полостей, эффективная теплопередача которых зависит от конвекции и излучения. Поэтому для ответа на первый вопрос необходимо использовать полученное опытным путем значение приведенного термического сопротивления. Для расчета эффективной теплопроводности воздушных полостей сотрудниками ООО "ТОР" (Санкт-Петербург) написали специальный макрос, который все желающие могут скачать бесплатно.



Рассчитаем температурное поле стеклопакета с импостом. В силу симметрии геометрии и граничных условий рассмотрим только половину конструкции. В таких импостах правильное задание теплопроводности воздуха определяет точность.



## Использование специального макроса

Пользователям ELCUT открыт доступ к API интерфейсу программы и разработке своих собственных приложений на VBA. Для расчета эффективной теплопроводности воздушных полостей с учетом конвекции и излучения был разработан макрос для EXCEL по методике ISO.

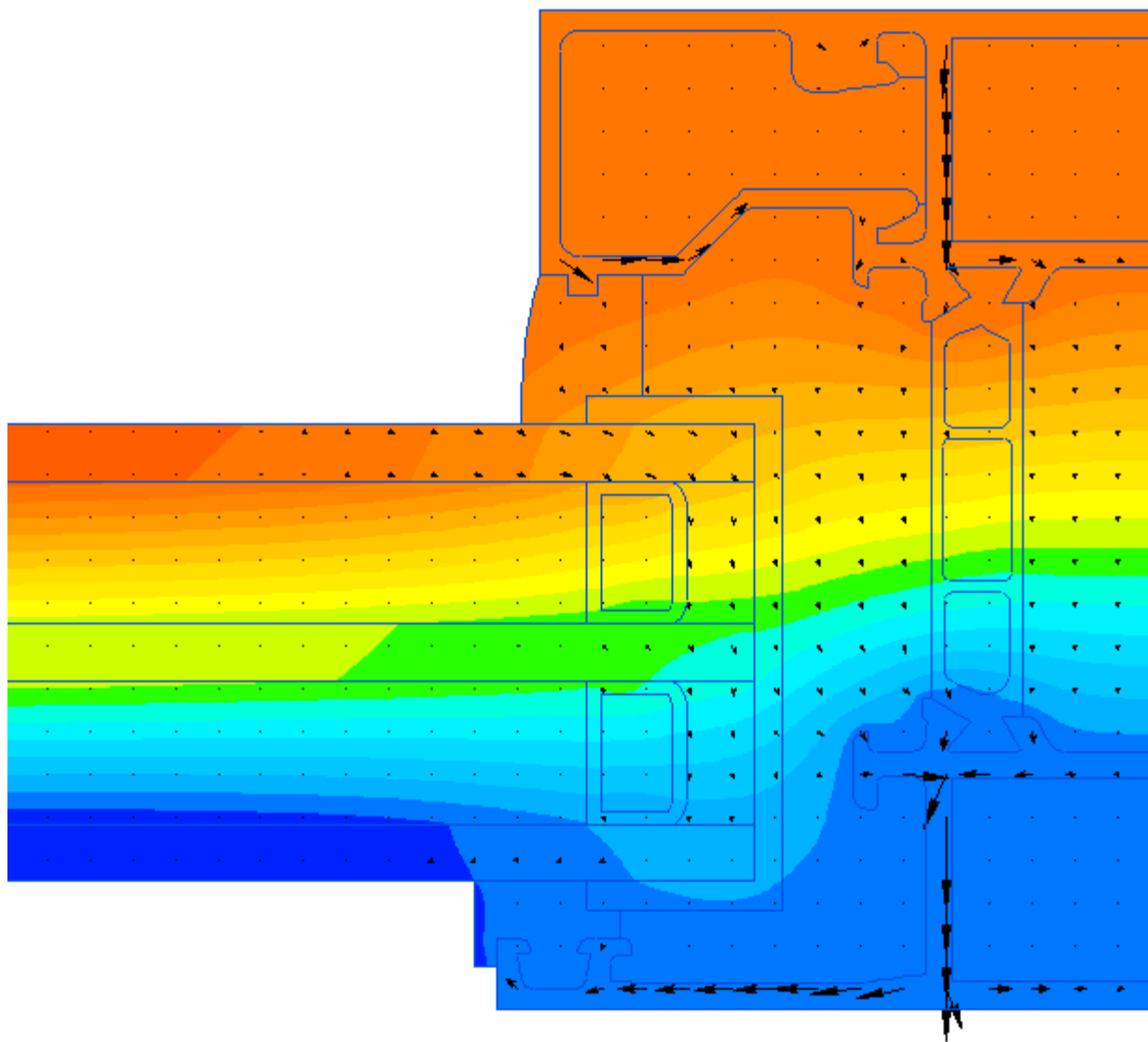
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
10										
11		1 - неветилируемая	Начальное	Площадь	1		2		3	
12	<b>Метка блока</b>	2 - слабо вентилируемая	$\lambda$ W/(K*m)	$m^2$	lambda	error	lambda	error	lambda	error
13	полость_1	1	0,05	0,0002986	0,07542	-40,5358%	0,07708762	-2,1869%	0,07707	0,0247%
14	полость_2	1	0,05	0,0006799	0,18941	-116,4630%	0,17634823	7,1449%	0,1771	-0,4248%
15	полость_3	1	0,05	9,051E-06	0,0354	34,1844%	0,0350654	0,9576%	0,03509	-0,0768%
16	полость_4	1	0,05	5,599E-06	0,03274	41,7189%	0,032437404	0,9308%	0,03246	-0,0677%
17	полость_5	1	0,05	0,0002016	0,07069	-34,2915%	0,068966651	2,4734%	0,06909	-0,1837%
18	полость_6	1	0,05	0,0003034	0,15234	-101,1552%	0,144301037	5,4183%	0,14486	-0,3883%
19	полость_7	1	0,05	0,0002016	0,05492	-9,3703%	0,055600075	-1,2390%	0,05555	0,0880%
20	полость_8	1	0,05	2,915E-05	0,04333	14,2867%	0,042573402	1,7682%	0,04263	-0,1218%
21	полость_9	1	0,05	4,871E-05	0,04766	4,7997%	0,047065149	1,2484%	0,0471	-0,0796%
22	полость_10	1	0,05	2,985E-05	0,03928	24,0148%	0,039459608	-0,4567%	0,03945	0,0299%
23	полость_11	1	0,05	3,997E-05	0,04435	11,9673%	0,043982278	0,8420%	0,04401	-0,0584%
24	полость_12	1	0,05	3,997E-05	0,04208	17,2100%	0,041874267	0,4825%	0,04189	-0,0267%
25										

Пользователь вводит в EXCEL такие же метки воздушных полостей как в ELCUT, начальное значение коэффициента теплопроводности и признак полости (неветилируемая или слабо вентилируемая). Расчет эффективной теплопроводности сходится за 3-4 итерации.





## Результаты расчета



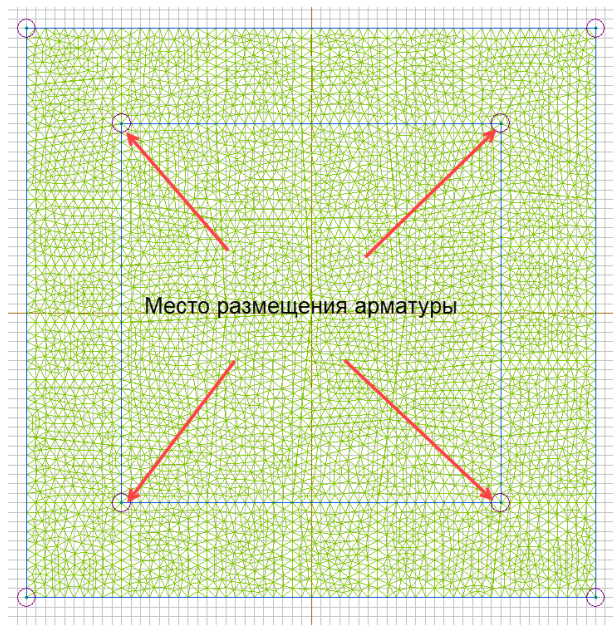
На рисунке слева показано температурное изополе и векторы тепловых потоков в конструкции. Видно, что большая часть потока идет через воздушные полости.



## Нестационарная теплопередача в программе ELCUT

Как правило необходимость использования нестационарной теплопередачи связано с зависимостью граничных условий от времени. Например, суточных колебания температуры помещения, расчет промерзания грунта или оценка огнестойкости.

Рассмотрим задачу расчета огнестойкости, взятую из монографии Фокина К. Ф. В соответствии с отраслевыми документами будем считать, что потеря несущей способности металла происходит при температуре 500 °С. Комплексный коэффициент теплопередачи равен по рекомендациям отраслевых документов 29 Вт/м<sup>2</sup>\*°С

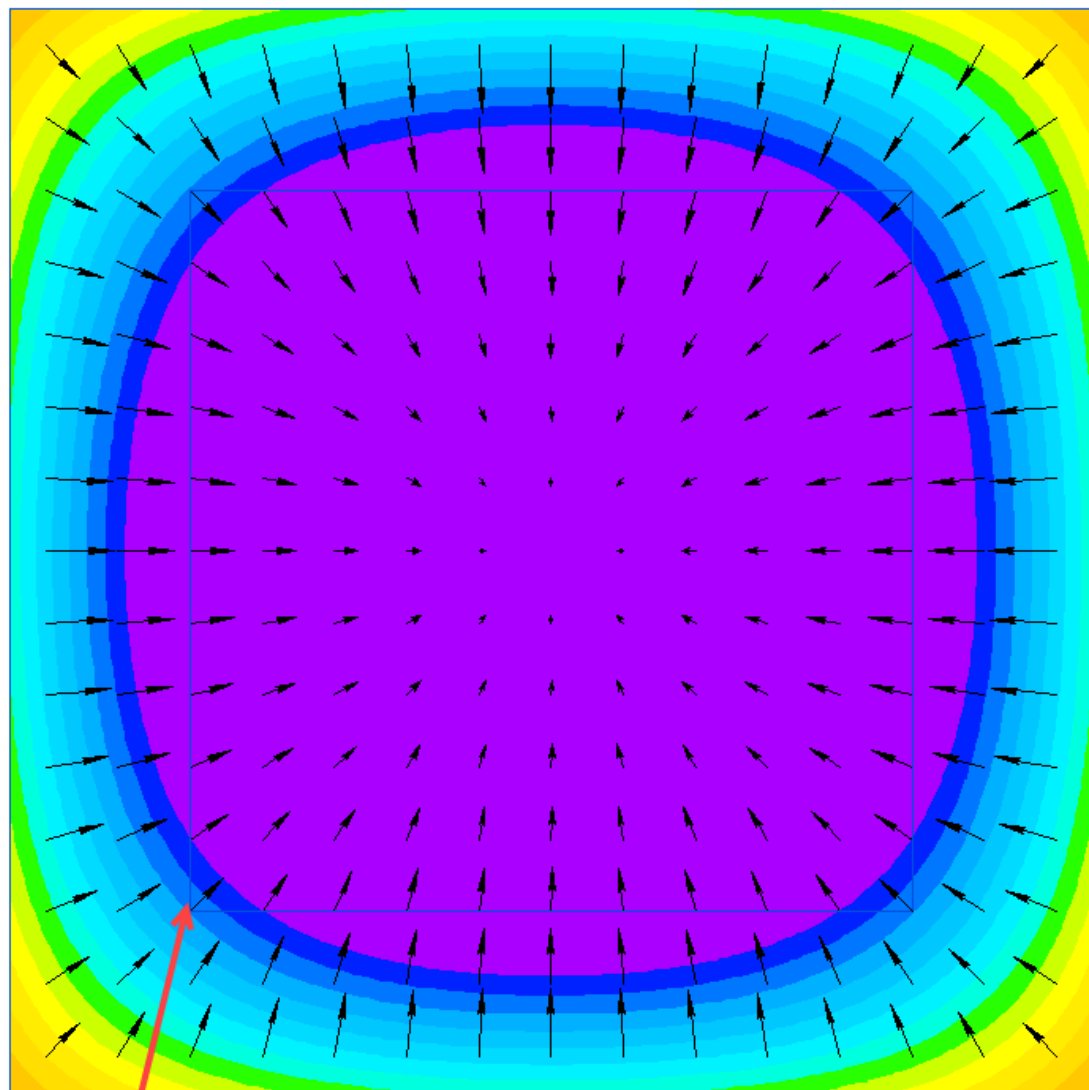


Модель представляет собой поперечное сечение колонны 300 \* 300 мм. Арматура находится на расстоянии 50 мм от внешней поверхности колонны. Начальной температурой колонны будем считать 18° С. В нестационарных расчетах задается шаг интегрирования по времени. Он зависит от длительности процесса в целом и скорости изменения температуры. Можно рассчитать задачу с разным шагом и сравнить результаты. В данном случае 10 сек. Кроме того, необходимо задать как часто программа будет запоминать результаты решения. В данном случае 15 мин.

Граничные условия в ELCUT могут задаваться как функция времени. В этой задаче температура воздуха изменяется по закону стандартного пожара  $t_B = 149.8 * \ln(0.133 * \tau + 1) + 18^\circ\text{C}$ , где  $\tau$  – время в с



## Результаты расчета



$T = 500\text{ C}$  достигается через 5400 с (1, 5 часа) в угловых точках размещения арматуры

Расчет показал, что температура  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (предел огнестойкости) достигается через 1, 5 часа с начала пожара. Средствами ELCUT также можно отследить график изменения температуры в точке размещения арматуры от времени, задав координаты этой точки. Использованию ELCUT для нестационарных расчет помогает и поддержка физической нелинейности.

