

Казанский государственный архитектурно-
строительный университет (КГАСУ)
г. Казань

ООО "Тор"
г. Санкт-Петербург



Расчет температурных полей в ELCUT при проектировании тепловой защиты зданий. Часть 1

7 октября 2015 года



Крайнов Дмитрий Владимирович

к.т.н., старший преподаватель

кафедра “Теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции”
Казанский государственный архитектурно-строительный
университет (Россия, г. Казань)

Научные направления и интересы:

- строительная теплофизика
- тепловая защита зданий
- энергосбережение в зданиях
- анализ энергопотребления зданиями
- информационное моделирование зданий (BIM)

Стаж работы в области: 10 лет.

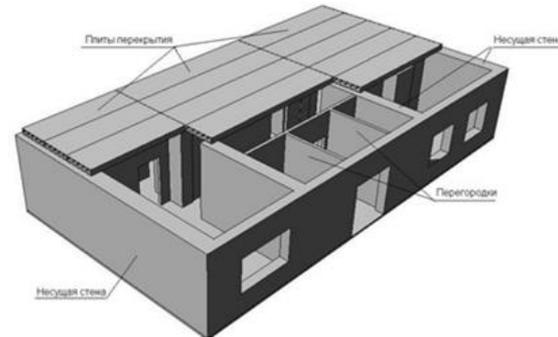
- 1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий**
- 2. Нормативные требования тепловой защиты зданий**
- 3. Теплотехнические неоднородности**
- 4. История расчетов температурных полей**
- 5. Расчет температурных полей в ELCUT**
- 6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей**

- 1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий**
2. Нормативные требования тепловой защиты зданий
3. Теплотехнические неоднородности
4. История расчетов температурных полей
5. Расчет температурных полей в ELCUT
6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей

Основные виды ограждающих конструкций современных зданий



1. Трехслойные панели с утеплителем на гибких связях



2. Несущие и ненесущие стеновые конструкции

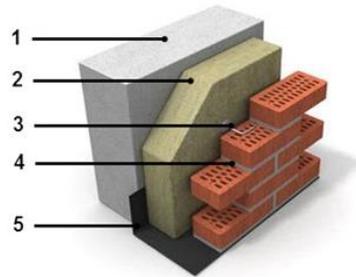


3. Металлические панели с эффективным утеплителем (сендвич панели)



4. Фасадное остекление

2. Несущие и ненесущие стеновые конструкции



1 – основной слой стены, 2 – утеплитель,
3 – крепежный элемент, 4 – защитно-
декоративная кладка, 5 – гидроизоляция



Стеновые конструкции с
облицовкой из кирпичной
кладки



Фасадные системы с тонким
штукатурным слоем
(«мокрый фасад»)



Навесные фасадные системы
(НФС) с вентилируемой
воздушной прослойкой
(«вентилируемый фасад»)

1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий
- 2. Нормативные требования тепловой защиты зданий**
3. Теплотехнические неоднородности
4. История расчетов температурных полей
5. Расчет температурных полей в ELCUT
6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей

СП 50.13330.2012 “Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003”

А. Поэлементные требования (стены, окна, двери, перекрытия...)

$$R_o^{np} \geq R_o^{норм}$$

$$\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Вт} \right]$$

Б. Комплексное требование (теплозащитная оболочка здания)

$$k_{об} \leq k_{об}^{mp}$$

$$\left[\frac{Вт}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$$

В. Санитарно-гигиеническое требование (отсутствие конденсата на внутренней поверхности)

$$t_{вн} \geq t_{мин} = t_{тp} + (2 \div 3)$$

$$\left[^\circ C \right]$$

Необходимо одновременное выполнение требований а), б) и в.

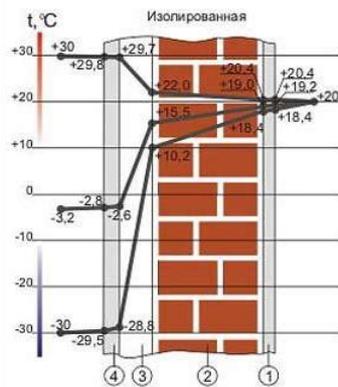
Нормативные требования тепловой защиты зданий

Санитарно-гигиеническое требование

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции **в зоне теплопроводных включений**, в углах и оконных откосах, а также зенитных фонарей должна быть **не ниже точки росы** внутреннего воздуха при расчетной температуре наружного воздуха - t_n .

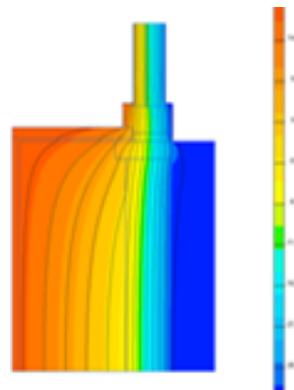
Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции **должна определяться по результатам расчета температурных полей** всех зон с теплотехнической неоднородностью или по результатам испытаний в климатической камере в аккредитованной лаборатории.

Температурное поле



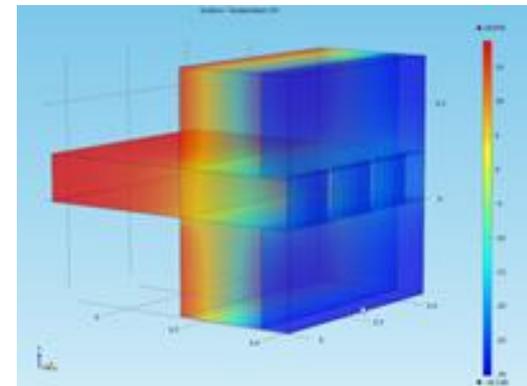
одномерное

гладь конструкции



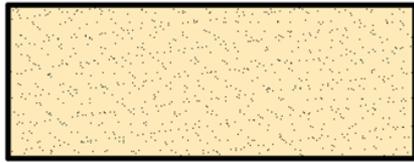
двумерное

теплотехнические неоднородности

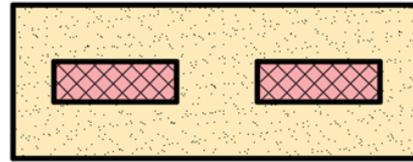


трехмерное

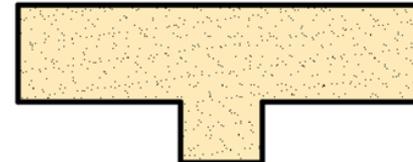
1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий
2. Нормативные требования тепловой защиты зданий
- 3. Теплотехнические неоднородности**
4. История расчетов температурных полей
5. Расчет температурных полей в ELCUT
6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей



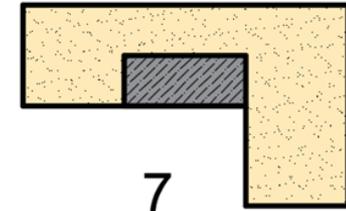
1



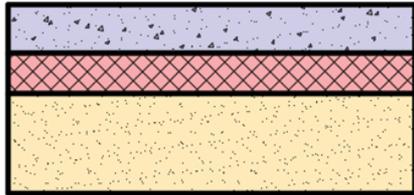
3



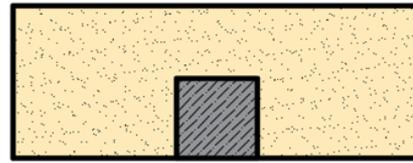
5



7



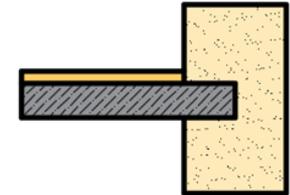
2



4



6



8

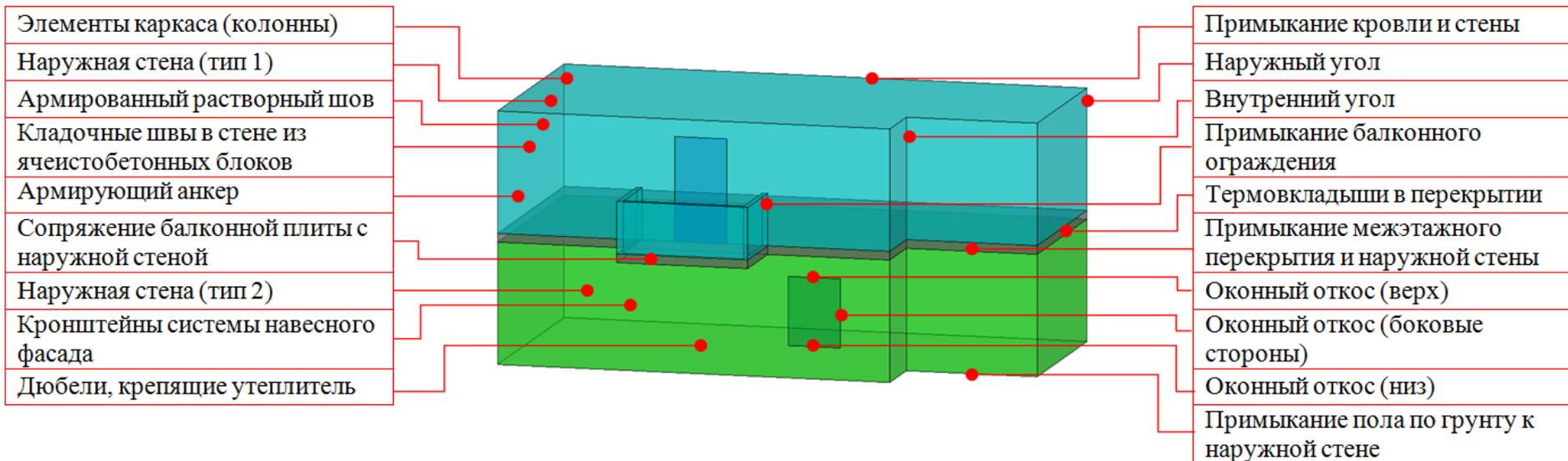
**Однородные
ограждающие
конструкции:**

- 1 – однослойная
- 2 – многослойная

Теплотехнические неоднородности:

- 3-4 – тип 1: теплопроводное включение
- 5-6 – тип 2: геометрическая неоднородность
- 7-8 – тип 3: смешанные неоднородности

Теплотехнические неоднородности



1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий
2. Нормативные требования тепловой защиты зданий
3. Теплотехнические неоднородности
- 4. История расчетов температурных полей**
5. Расчет температурных полей в ELCUT
6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей

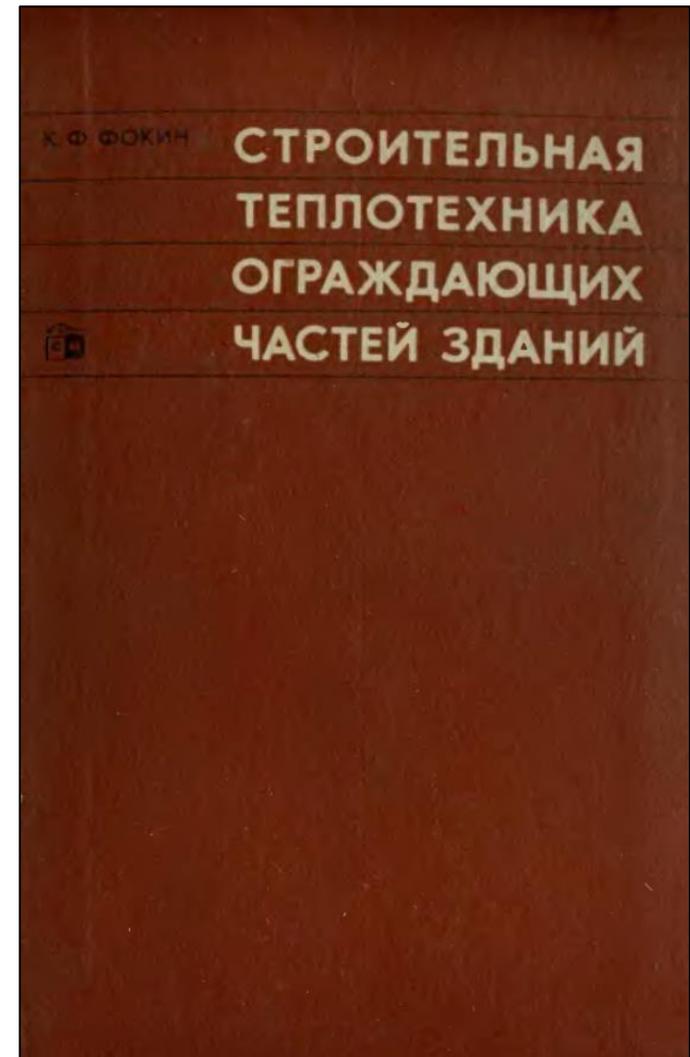
кон. 1920-х - нач. 1940-х годов

Фокин Константин Федорович

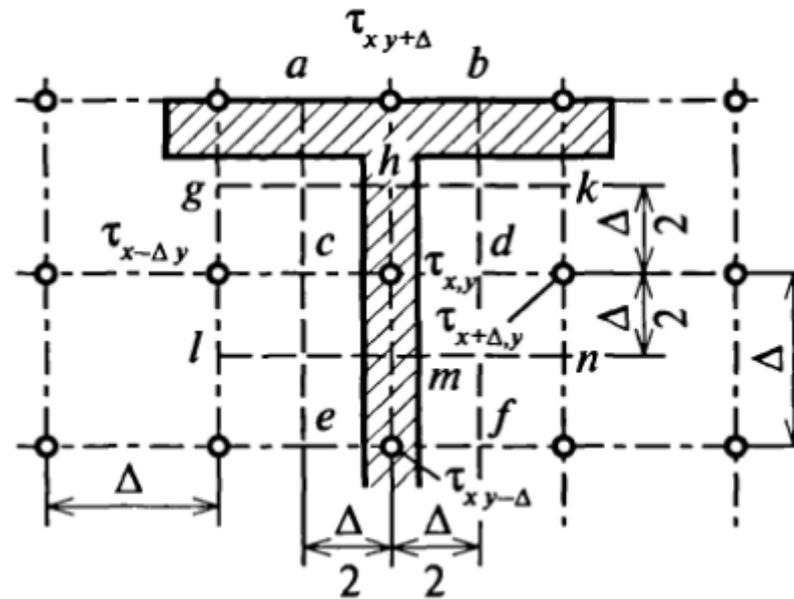
**Книга “Строительная теплотехника
ограждающих частей зданий”**

издания 1933 г. и 1937 г.

**Доклады о влиянии железобетонного
каркаса и металлических включений на
распределение температуры**



Ручной расчетный метод

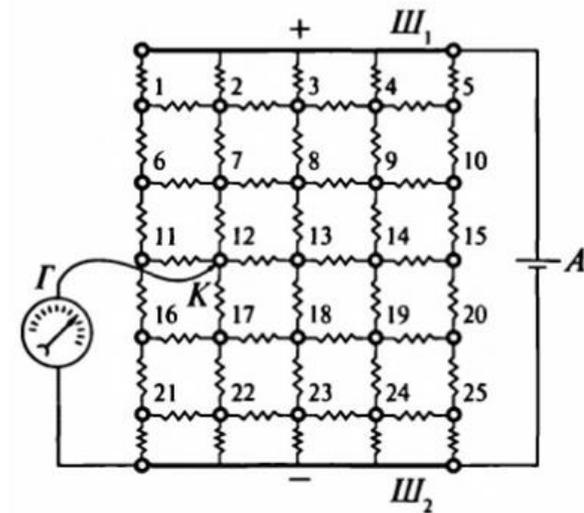


$$\tau_{x,y} = \frac{k_{x-\Delta} \tau_{x-\Delta,y} + k_{y+\Delta} \tau_{x,y+\Delta} + k_{x+\Delta} \tau_{x+\Delta,y} + k_{y-\Delta} \tau_{x,y-\Delta}}{k_{x-\Delta} + k_{y+\Delta} + k_{x+\Delta} + k_{y-\Delta}}.$$

Электромоделирование температурных полей (Электро-тепловая аналогия)



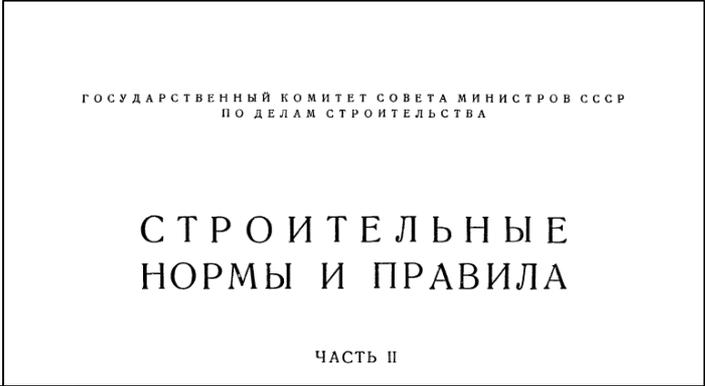
Электроинтегратор ЭИ-12



Электрическая моделирующая схема

1954 год

Строительные нормы и правила



14. Температура внутренней поверхности ограждения $t_{в}$ в местах более теплопроводных включений, имеющих прямоугольное сечение (диафрагмы, толстые сквозные швы раствора, прокладные ряды, поперечные стенки пустотелых камней, колонны и ригели железобетонного каркаса и пр.), должна быть не ниже точки росы внутреннего воздуха.
Температура внутренней поверхности ограждения в местах более теплопроводных включений

Примечания. 1. Графические схемы некоторых теплопроводных включений с показаниями размеров a и b даны на рис. 2.

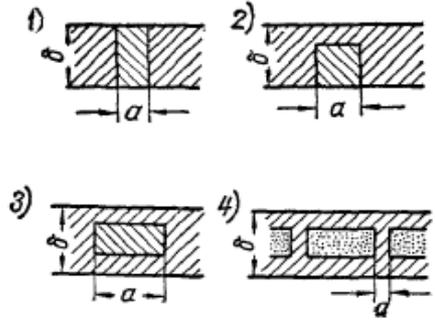


Рис. 2

2. При $\frac{a}{b} \geq 1,5$ теплопроводное включение должно рассматриваться как самостоятельная часть ограждения

4. Для включений сложного профиля или выступающих за поверхности ограждения требуются специальные расчеты их температурных полей.

1959 год

д.т.н., проф. Фокин К.Ф.

Теплотехнический режим железобетонных оконных коробок в крупнопанельных стенах

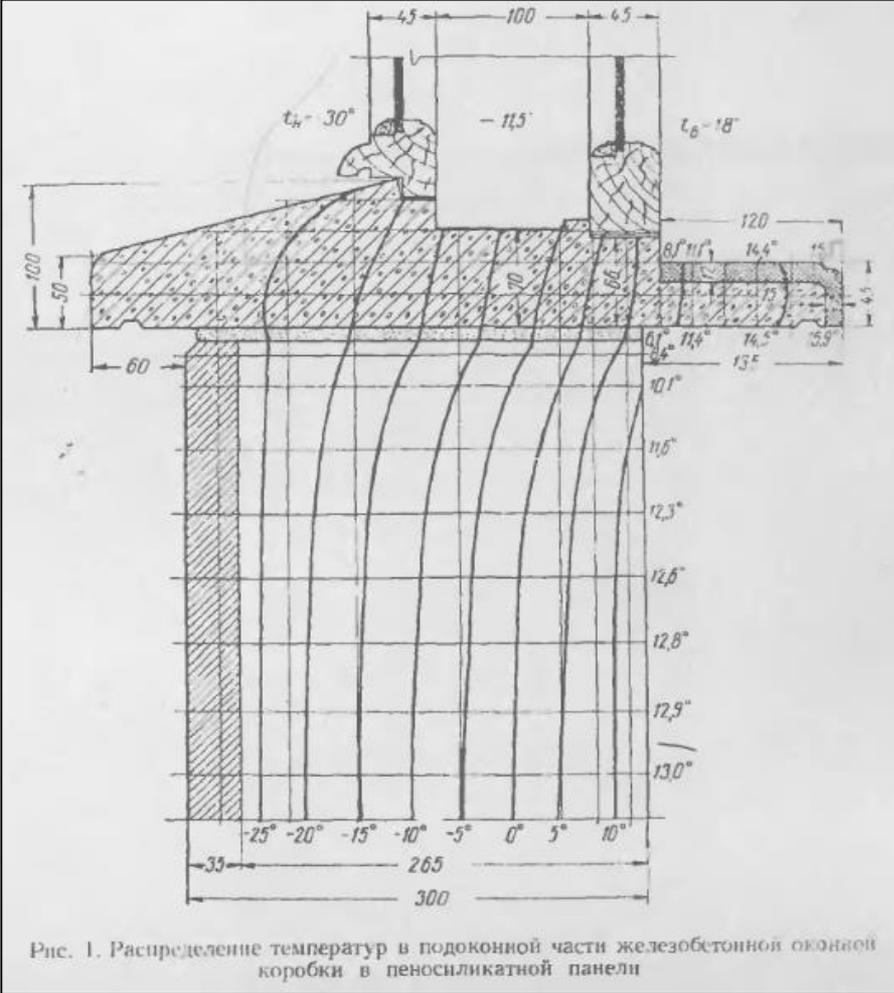


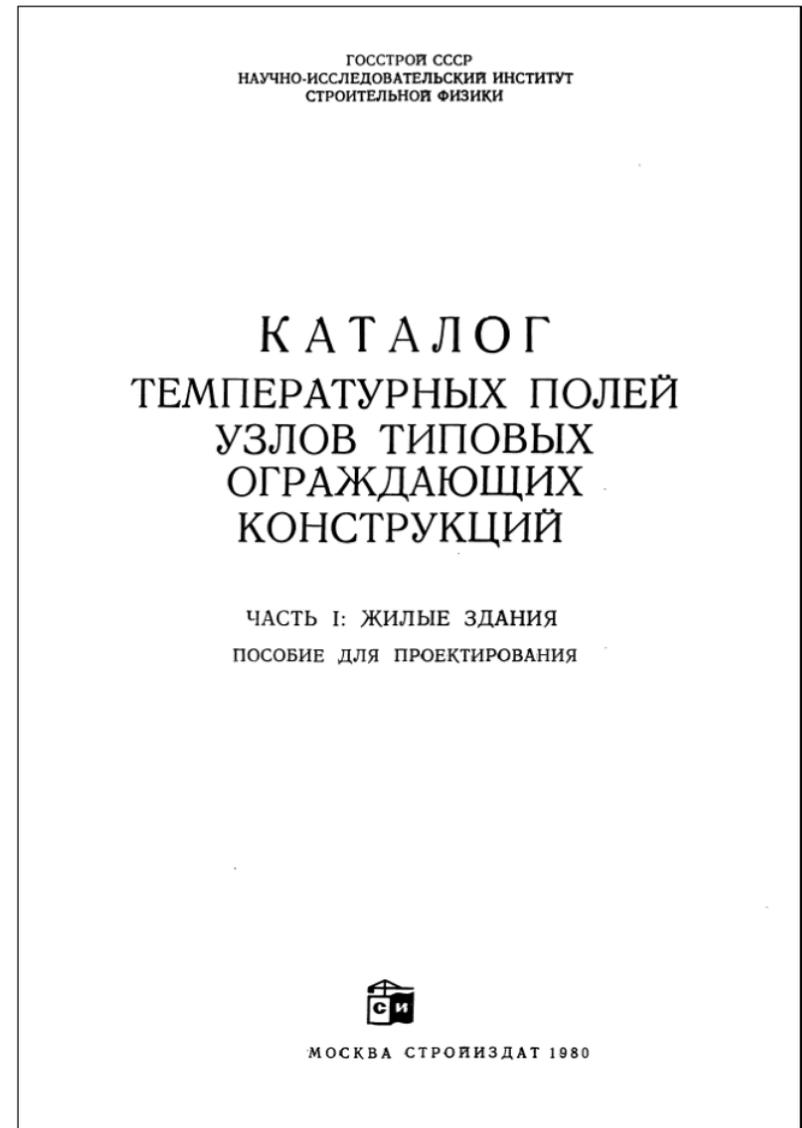
Рис. 1. Распределение температур в подоконной части железобетонной оконной коробки в пеносиликатной панели

1980 год

**НИИ Строительной физики
Госстроя СССР**

**Каталог температурных полей
узлов типовых ограждающих
конструкций**

Расчет на ЭВМ

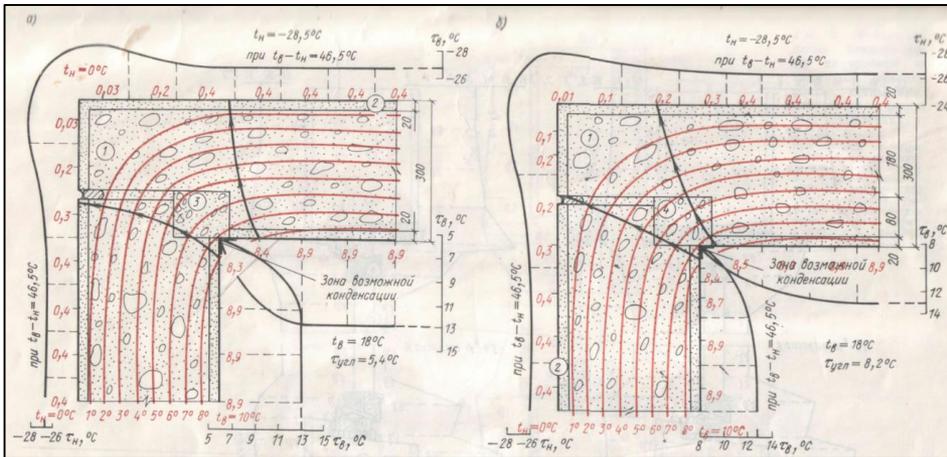
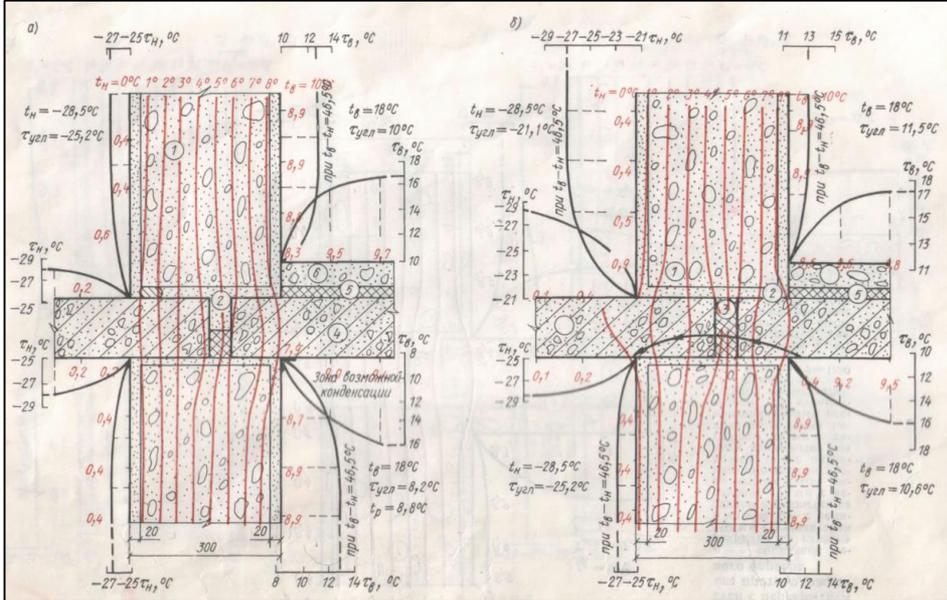


1980 год

НИИ Строительной физики
Госстроя СССР

Каталог температурных полей
узлов типовых ограждающих
конструкций

Расчет на ЭВМ



2000 - настоящее время

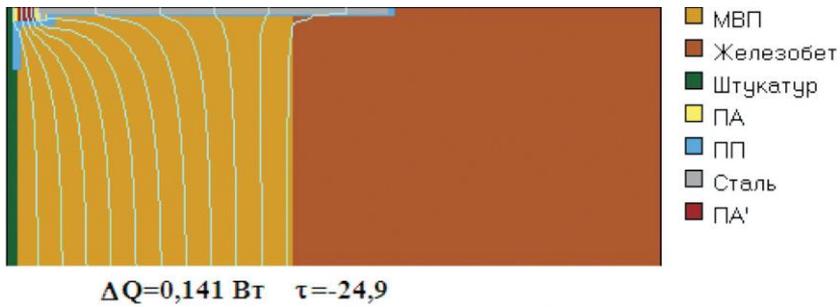
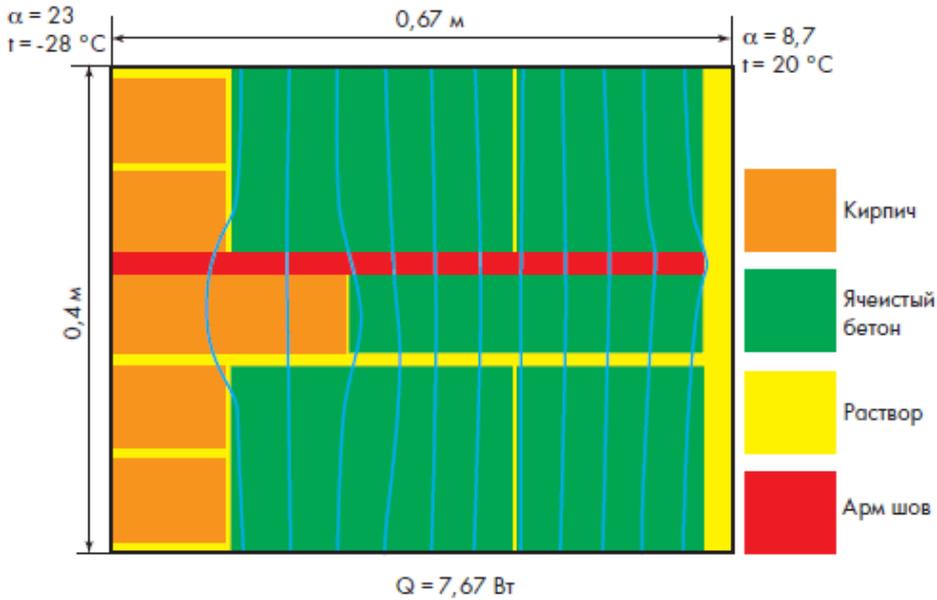
НИИ Стоительной физики

д.т.н. Гагарин В.Г.

к.т.н. Козлов В.В.

Расчет температурных полей конструктивных элементов наружных ограждений

Расчет на ЭВМ

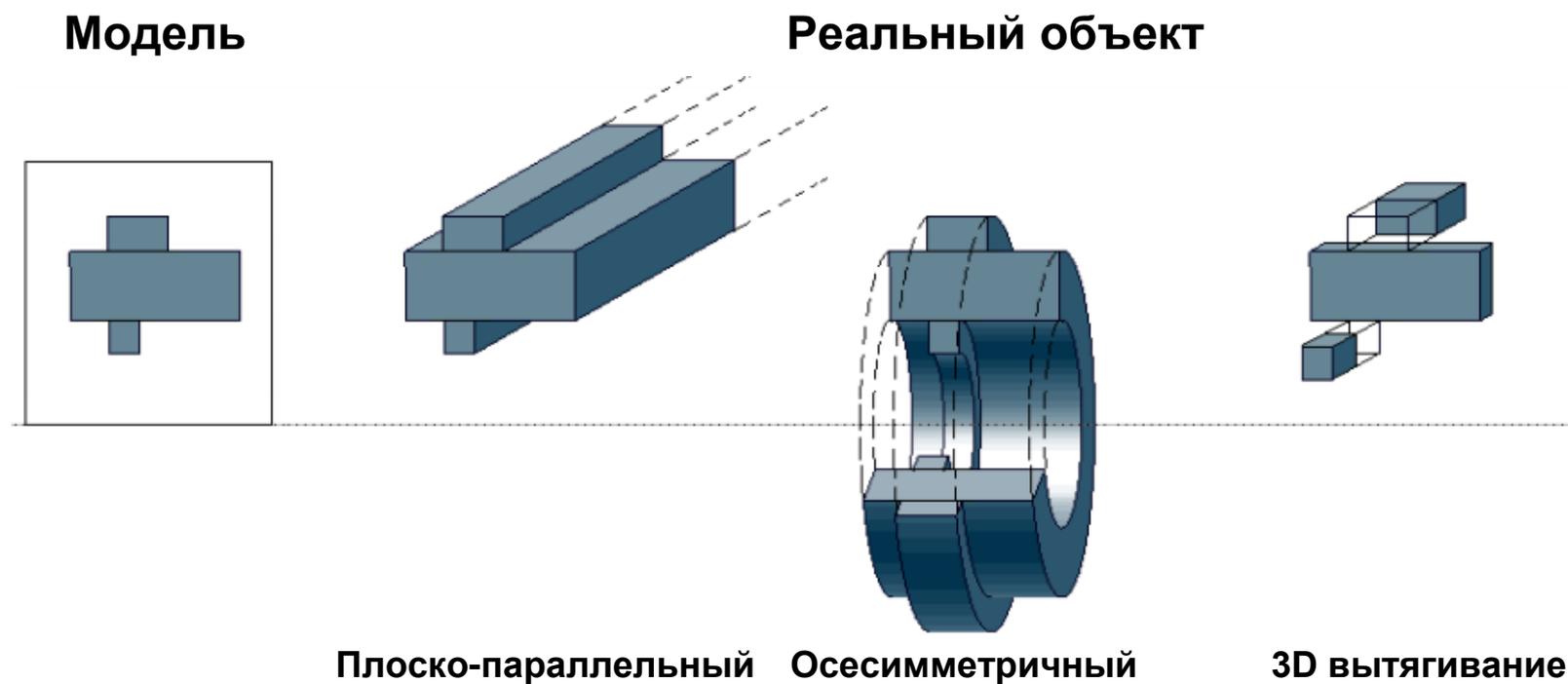


1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий
2. Нормативные требования тепловой защиты зданий
3. Теплотехнические неоднородности
4. История расчетов температурных полей
- 5. Расчет температурных полей в ELCUT**
6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей

Магнитные задачи	Магнитостатика
	Синусоидальное магнитное поле
	Нестационарное магнитное поле
Электрические задачи	Электростатика
	Электрическое поле постоянных токов
	Электрическое поле переменных токов
	Нестационарное электрическое поле
Тепловые и механические задачи	Стационарная теплопередача
	Нестационарная теплопередача
	Анализ упругих деформации

- 1. Создание геометрии**
- 2. Создание и назначение**
 - 1. материалов**
 - 2. граничных условий**
 - 3. сетки конечных элементов**
- 3. Расчет задачи и анализ результатов**
- 4. Экспорт результатов расчета**

1. Создание геометрии (вершина, ребро, блок)



Импорт геометрии:

- DXF
- SolidWorks

2.1. Материалы (метки блоков)

Свойства метки блока - Кирпич

Общие

Теплопроводность

$\lambda_x =$ (Вт/К·м)

$\lambda_y =$ (Вт/К·м)

Нелинейный материал Анизотропный материал

Объемная плотность тепловыделения

Q = (Вт/м³) **f**

Зависит от температуры

Данные для переходных процессов

C = (Дж/кг·К)

Зависит от температуры

$\rho =$ (кг/м³)

Координаты

Декартовы

Полярные

OK Отмена Справка

2.2. Граничные условия (метки ребер и вершин)

Свойства метки ребра - Вн.воздух

Общие

Температура: $T = T_o$
 $T_o = 0$ (К)

Тепловой поток: $F_n = -q$ ($\Delta F_n = -q$)
 $q = 0$ (Вт/м²)

Конвекция: $F_n = \alpha \cdot (T - T_o)$ **f**
 $\alpha = 8.7$ (Вт/К·м²)
 $T_o = 20$ (К)

Радиация: $F_n = \beta \cdot k_{sb} \cdot (T^4 - T_o^4)$
 $\beta = 0$
 $T_o = 0$ (К)

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

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

OK Отмена Справка

Свойства метки вершины - Источник

Общие

Температура: $T = T_o$
 $T_o = 20$ (К) **f**

Источник тепла
 $q = 0$ (Вт/м)

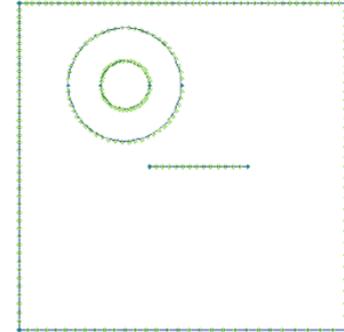
OK Отмена Справка

2.3. Сетка КЭ (модель дискредитации)

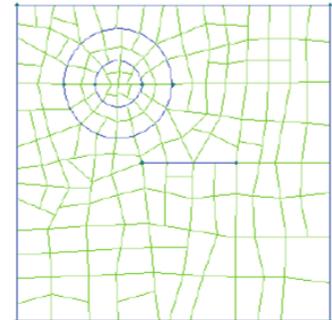
1. Используется линейный треугольный элемент
2. Специальные алгоритмы позволяют быстро обрабатывать большое количество треугольников
3. Построение сетки КЭ производится автоматически
4. Механизм для ручного контроля густоты сетки КЭ
5. Автоматический механизм увеличения густоты сетки КЭ, работающий на основе оценки погрешности решения задачи

Метод геометрической декомпозиции

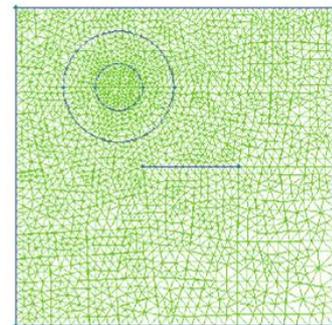
Шаг 1: автоматическая дискредитация ребер модели



Шаг 2: расчетная область разделяется на подобласти (домены)



Шаг 3: каждый домен разбивается на треугольники



Расчет температурных полей в ELCUT

3. Расчет задачи и анализ результатов

Результат расчета 10_Плита перекрытия межэтажного.pbm1

Калькулятор

- Локальные значения
- Интегральный калькулятор
- Геометрические величины
 - Длина контура: $L = 2.3498 \text{ м}$
 - Площадь поверхности: $S = 2.3498 \text{ м}^2$
- Физические величины
 - Тепловой поток: $\Phi = -14.444 \text{ Вт}$
 - Разница температур: $\Delta T = 1.0678 \text{ К}$
 - Средняя температура по объему: $T_s = 19.293 \text{ К}$

График Результат расчета 10_Плита перекрытия межэтажного.pbm4

Температура (K) vs. L (m)

L (m)	Температура (K)
0.00000	19.9830
0.117492	19.9800
0.234984	19.9702
0.352476	19.9501
0.469968	19.9132
0.587459	19.8462
0.704951	19.7270
0.822443	19.5140
0.939935	19.1198
1.057426	18.9069
1.174918	18.9772
1.292410	19.1198
1.409902	19.1198
1.527394	19.1198
1.644886	19.1198
1.762378	19.1198
1.879870	19.1198
1.997362	19.1198
2.114854	19.1198
2.232346	19.1198
2.349838	19.1198

Таблица Результат расчета 10_Плита перекрытия межэтажного.pbm3

L (m)	x (m)	y (m)	N_x	N_y	T (K)	G (K/m)	G_x (K/m)	G_y (K/m)	G_z (K/m)
0.00000	0.00000	1.34984	0.00000	-1.00000	19.9830	0.0616394	0.0142065	0.0599799	-0.00000
0.117492	0.117492	1.34984	0.00000	-1.00000	19.9800	0.102027	0.0557037	0.0854793	-0.00000
0.234984	0.234984	1.34984	0.00000	-1.00000	19.9702	0.181390	0.129368	0.127147	-0.00000
0.352476	0.352476	1.34984	0.00000	-1.00000	19.9501	0.320126	0.239027	0.212947	-0.00000
0.469968	0.469968	1.34984	0.00000	-1.00000	19.9132	0.565647	0.427549	0.370348	-0.00000
0.587459	0.587459	1.34984	0.00000	-1.00000	19.8462	1.01391	0.773098	0.656000	-0.00000
0.704951	0.704951	1.34984	0.00000	-1.00000	19.7270	1.80511	1.37937	1.16437	-0.00000
0.822443	0.822443	1.34984	0.00000	-1.00000	19.5140	3.19959	2.43749	2.07269	-0.00000
0.939935	0.939935	1.34984	0.00000	-1.00000	19.1198	6.01178	4.69575	3.75385	-0.00000
1.057426	1.057426	1.29238	-1.00000	-0.00000	18.9069	10.3197	10.2262	1.38643	-0.00000
1.174918	1.057426	1.17492	-1.00000	-0.00000	18.9772	9.57048	9.56856	0.191455	-0.00000

Работа с картиной поля

Когда Вы используете команду анализа решения, ELCUT открывает новое окно, в котором изображается картина вычисленного поля. В этом окне Вы можете:

- При помощи команды **Свойства картины поля** выбрать способы графического представления полевых характеристик, их масштабы и диапазоны;
- Установить масштаб изображения;
- Выбрать момент времени;
- Просматривать локальные значения полевых величин в указанных точках;
- Создавать и модифицировать контур;
- Вычислять интегральные характеристики;
- Строить графики;
- Выводить таблицы;
- Экспортировать значения поля.

Картина поля может быть скопирована в буфер обмена Windows или сохранена в файле. Картина поля с цветовой картой оснащается **цветовой шкалой**. Вы можете одновременно

Для вывода справки нажмите клавишу F1

2.670 м, -0.290 м

Расчет температурных полей в ELCUT

4. Экспорт результатов расчета

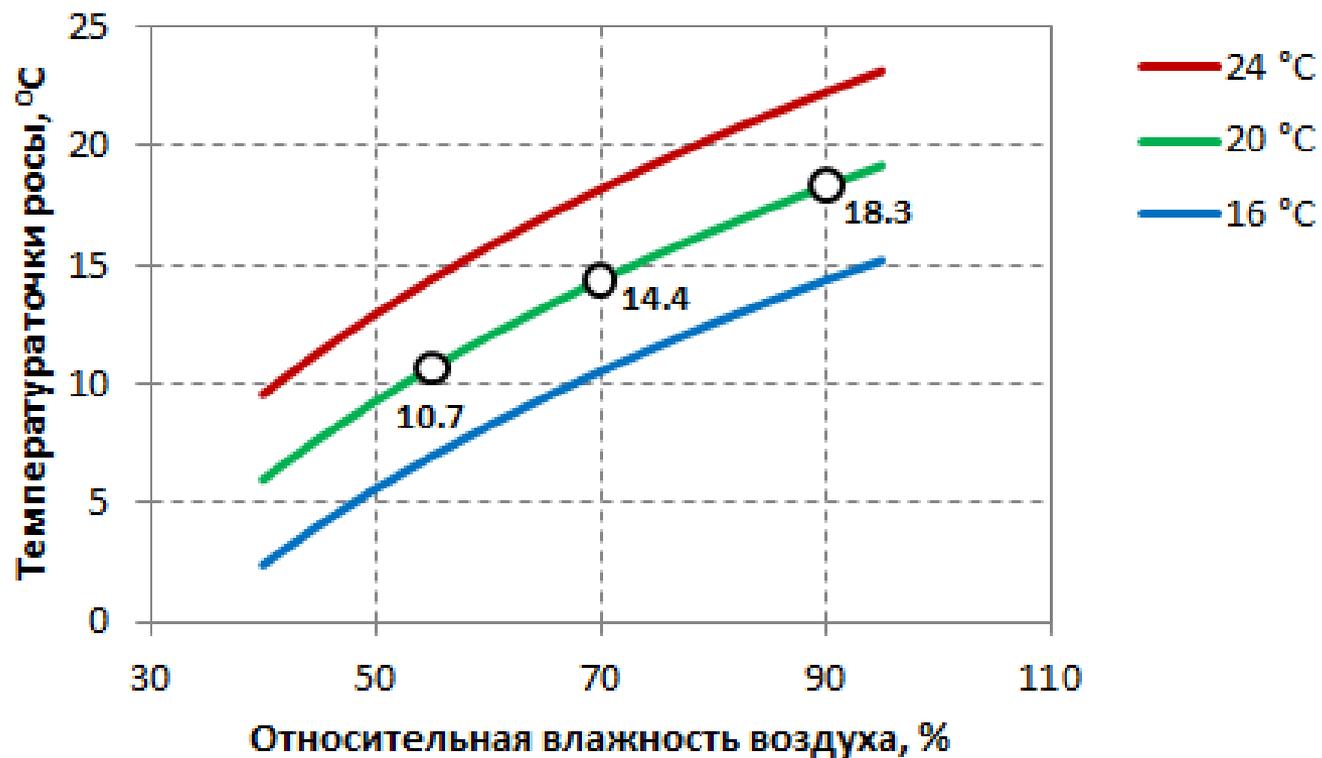
The screenshot displays the ELCUT software interface. On the left, a 'Сохранить картинку' (Save Image) dialog box is open, showing the file name 'Угол с колонной.png' and a list of file formats including PNG, WMF, EMF, BMP, GIF, JPEG, and TIF. A mouse cursor is hovering over the 'JPEG - Рисунок JPEG (*.jpg)' option. Below the dialog, a small color gradient bar is visible. On the right, a graph window titled 'Температура [K]' shows a temperature profile. The y-axis ranges from 160 to 195 K, and the x-axis ranges from 0.0 to 1.9. The graph shows a temperature curve that starts at approximately 181 K at x=0, drops to a minimum of about 161 K at x=0.5, and then rises to about 193 K at x=1.9. A context menu is open over the graph, with 'Экспорт картинку...' (Export Image...) selected. The legend on the right indicates that the green line represents 'Температура' (Temperature).

Position (x)	Temperature (K)
0.0	181
0.1	180
0.2	178
0.3	175
0.4	172
0.5	161
0.6	170
0.7	178
0.8	185
0.9	190
1.0	192
1.1	193
1.2	193
1.3	193
1.4	193
1.5	193
1.6	193
1.7	193
1.8	193
1.9	193

Пример расчета

В. Санитарно-гигиеническое требование (отсутствие конденсата на внутренней поверхности)

$$t_{\text{вн}} \geq t_{\text{мин}} = t_{\text{тр}} + (2 \div 3)$$

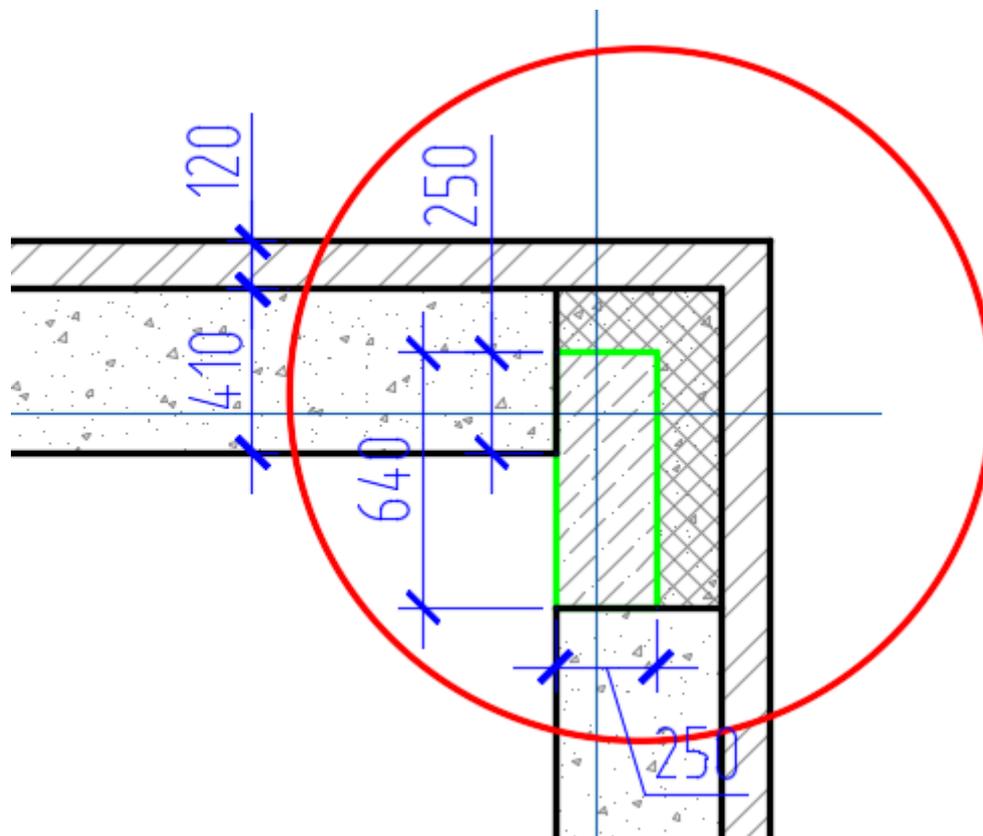


Примеры расчетов

Материал	Плотность, кг/м ³	Расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C
Цементно-песчаный раствор	1800	0,93
Газобетон	400	0,15
Кирпичная кладка	1800	0,87
Железобетон	2500	2,04
Минеральная вата	60	0,045
Дерево	500	0,18
Стеклопакет	-	0,07
Монтажная пена	40	0,04

Примеры расчетов

1. Проверка нормативных требований



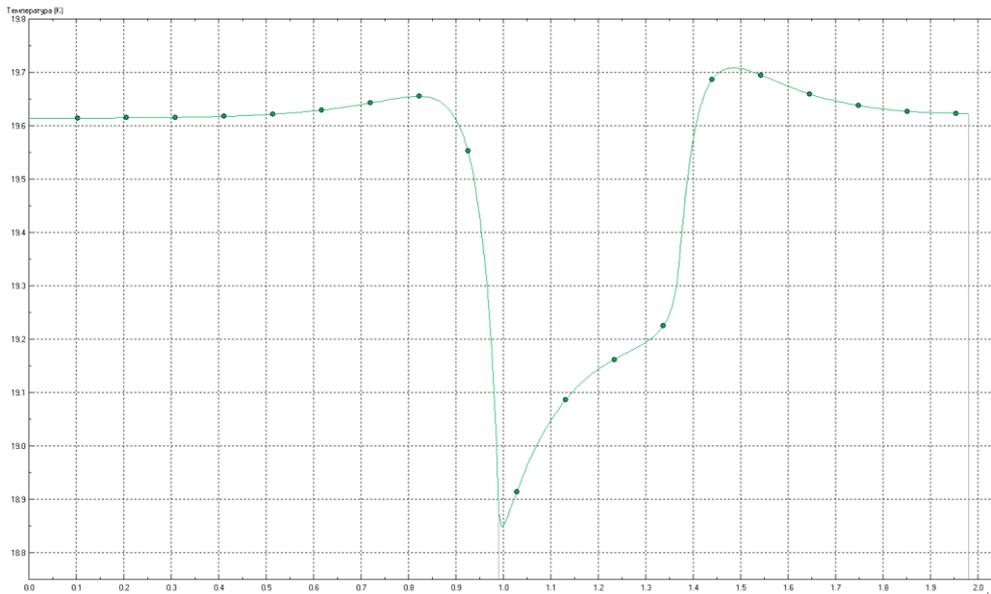
Примеры расчетов

2. Пересчет поля на другую расчетную температуру наружного воздуха

Перепад температур для общего случая: $t_B - t_H = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Пересчет на расчетный перепад температур:

$$t_{\text{вн}}^p = t_{\text{в}} - \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})^p}{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})} (t_{\text{в}} - t_{\text{вн}})$$

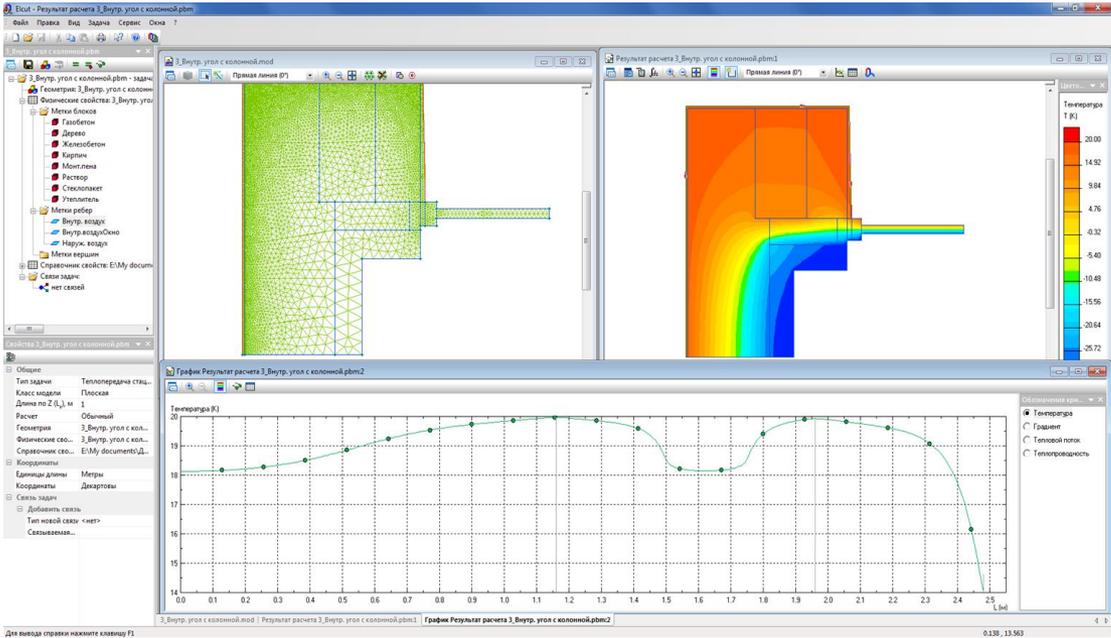


$$t_{\text{МИН ВП}} = 18,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{МИН ВП}}^p = 14,25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } t_{\text{н}}^p = -30 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Примеры расчетов

3. Определение минимальной температуры наружного воздуха, при которой не выпадает конденсат



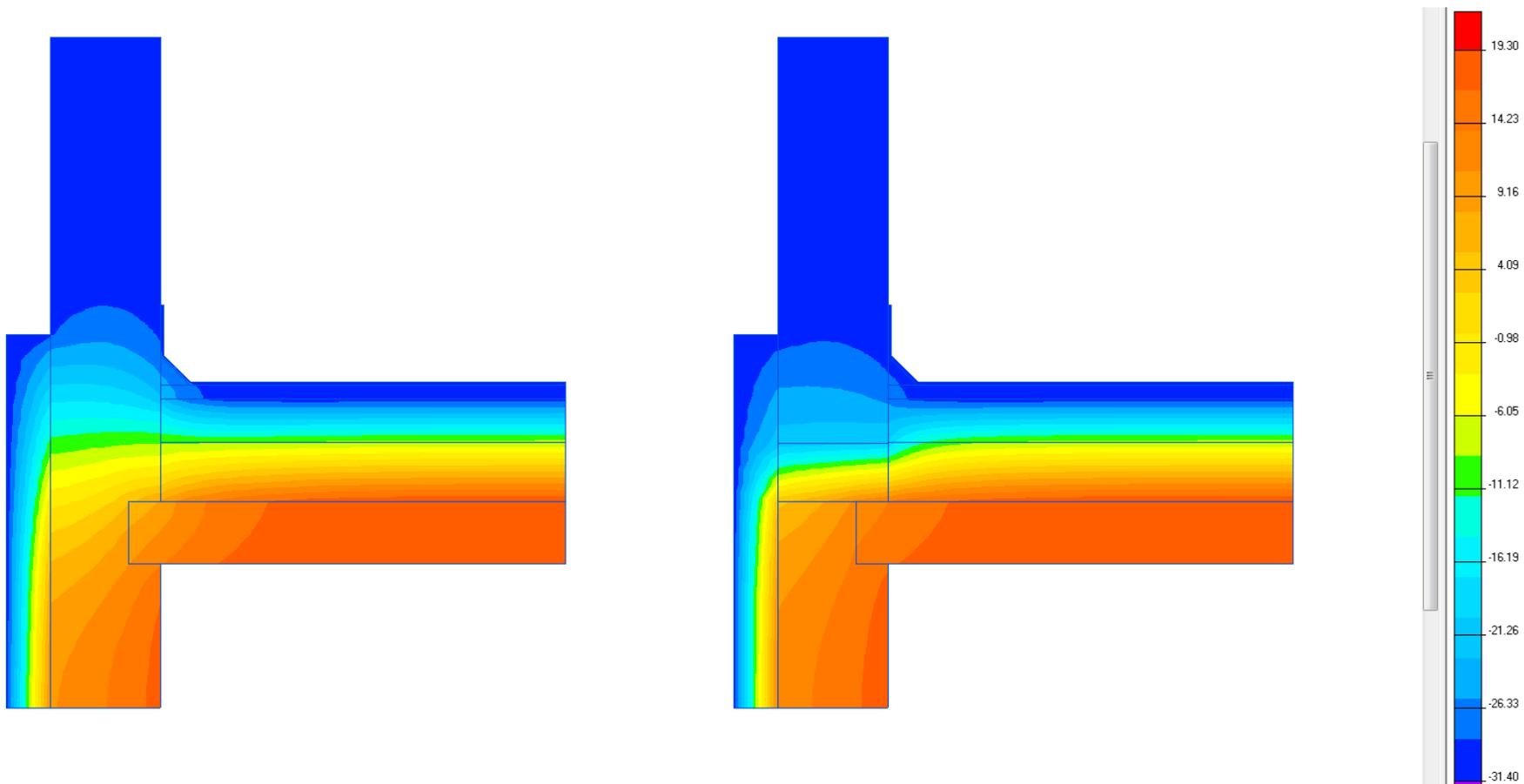
$$t_H^{доп} = t_e - \frac{t_e - t_p}{t_e - t_{eH}^{мин}} (t_e - t_H)$$

$$t_{мин п.в.} = 14,2 \text{ } ^\circ\text{C (при } t_H = -30 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$t_{мин п.в.}^{расч} = 10,7 \text{ } ^\circ\text{C (при } t_H^{доп} = -60,2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Примеры расчетов

4. Оптимизация конструкции



1. Основные виды ограждающих конструкций современных зданий
2. Нормативные требования тепловой защиты зданий
3. Теплотехнические неоднородности
4. История расчетов температурных полей
5. Расчет температурных полей в ELCUT
- 6. Кому и для чего необходим расчет температурных полей**

1. Проектные институты и организации

- разработка и оптимизация конструктивных узлов
- проектирование тепловой защиты здания
- проверка нормативных требований
- разработка раздела “Энергоэффективность”

2. Органы экспертизы

- экспертиза проектных решений
- проверка определенных разделов проектной документации

3. Строители, строительный надзор

- расчет строительных узлов “как есть”

4. Производители строительных конструкций и материалов

- разработка каталогов температурных полей узлов
- разработка каталогов удельных теплотехнических характеристик конструктивных элементов
- расчет теплопроводности строительных элементов (например, пустотных стеновых блоков)

Расчет температурных полей - повышение культуры и точности теплотехнических расчетов в строительстве



Крайнов Дмитрий Владимирович

к.т.н., старший преподаватель
кафедра “Теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции”
Казанский государственный архитектурно-строительный
университет (Россия, г. Казань)

E-mail: dmitriy.kraynov@gmail.com

Internet: tgv.kgasu.ru
te.kgasu.ru

