

Определение предела огнестойкости  
перекрытия по фактической горючей нагрузке  
*(фрагменты)*

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация.....	3
1. Моделирование пожара .....	4
Топология модели помещения (расчетная сетка).....	4
Описание расчетной модели пожара.....	4
Горючая нагрузка .....	5
Величины и плоскости измерения .....	7
Результаты моделирования пожара.....	8
2. Моделирование прогрева перекрытия .....	17
Общие сведения .....	17
Модель перекрытия.....	17
Результаты расчета.....	19
3. Определение фактического предела огнестойкости .....	34
Список использованных источников .....	35

## Аннотация

В работе описаны расчетная модель и результаты моделирования огневого воздействия горючей нагрузки на междуэтажное перекрытие, защищенное листами ГКЛЮ, на основе результатов моделирования развития опасных факторов пожара в помещении определен фактический предел огнестойкости перекрытия.

Цель расчета – определение фактического предела огнестойкости междуэтажного перекрытия с конструктивной огнезащитой, выполненной листами ГКЛЮ, по условиям фактической горючей нагрузки в помещении «.....» для подтверждения соответствия предела огнестойкости перекрытия принятой степени огнестойкости здания – II.

Объект – .....

Задачи:

- моделирование динамики температуры газовой среды в помещении при пожаре по условиям фактической горючей нагрузки;
- теплотехнический расчет (моделирование) прогрева междуэтажного перекрытия с конструктивной огнезащитой;
- определение фактического предела огнестойкости перекрытия.

# 1. Моделирование пожара

## *Топология модели помещения (расчетная сетка)*

Модель помещения выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2018 в соответствии с проектной документацией (рис. 1):

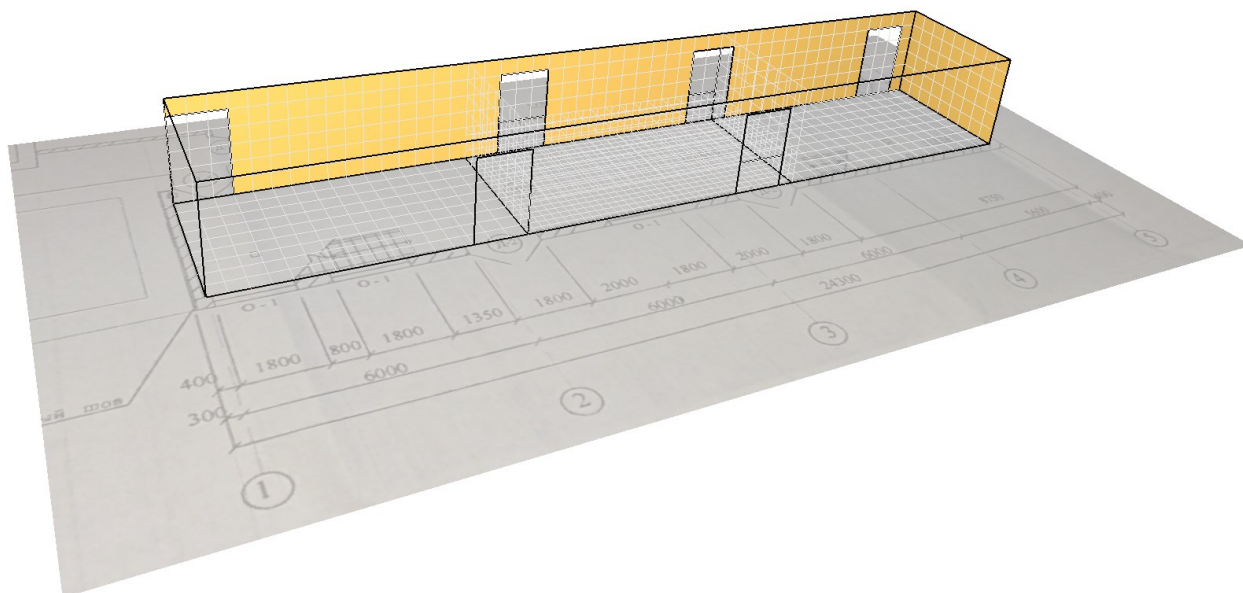


Рис. 1. Общий вид расчетной модели помещения

Размеры помещения в плане: 24,0 × 4,8 м.

Высота: 3 м.

Двери: 1400×2100, 1500×2300 и 1800×2300 мм.

## *Описание расчетной модели пожара*

Моделирование пожара в помещении выполнено в программе Pyrosim 2018, которая является графическим интерфейсом расчетного модуля FDS (Fire Dynamics Simulation).

Модель FDS представляет собой систему уравнений в частных производных, включающую уравнение сохранения массы, момента и энергии, и решается на трехмерной регулярной сетке. Тепловое излучение рассчитывается методом конечных объемов на этой же сетке. Для моделирования движения дыма, спринклеров и распыла топлива используются лагранжевы частицы.

На сегодняшний день приблизительно половина приложений модели служит для проектирования систем дымоудаления и изучения активации спринклеров и детекторов. Другая часть служит для восстановления картины пожара в жилых и производственных помещениях. Основной целью FDS на протяжении своего развития было решение прикладных задач пожаробезопасности и, в тоже время, обеспечение инструментарием для изучения фундаментальных процессов при пожаре.

Программа разрабатывается лабораторией строительных и пожарных исследований (BFRL) национального института стандартов и технологий США. Вклад в исследования и развитие модели внесли сотрудники комиссии по ядерному регулированию США (NRC), центра научно-технических исследований Финляндии (VTT), общества инженеров по пожарной безопасности (SFPE) и др.

Математическая модель FDS базируется на использовании дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температуры и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей на основе закона сохранения массы, закона сохранения момента импульса, закона сохранения энергии и других зависимостей. Для моделирования турбулентности FDS использует метод LES (Large Eddy Simulation) – масштабное моделирование вихрей.

В качестве модели сгорания используется модель доли в смеси (Mixture Fraction). «Доля в смеси» – скалярная величина, представляющая массовую долю одного или более компонентов газа в данной точке потока. По умолчанию рассчитываются два компонента смеси: массовая доля несгоревшего топлива и массовая доля сгоревшего топлива (т.е. продуктов сгорания).

Лучистый теплообмен включен в модель посредством решения уравнения переноса излучения для серого газа и, для некоторых ограниченных случаев, с использованием широкодиапазонной модели. Уравнение решается с помощью метода, аналогичного методу конечных объемов для конвективного переноса. Коэффициенты поглощения сажей и дымом вычислены с помощью узкополосной модели RADCAL.

Подробнее с математической моделью FDS можно ознакомиться в техническом руководстве [2].

Модель FDS подверглась подробным оценочным исследованиям, проводимым специалистами Национального института стандартов и технологий США (NIST) и других организаций. Подробнее результаты валидации FDS приведены в документе «Technical Reference Guide. Volume 3: Validation» [3].

### ***Горючая нагрузка***

Характеристики горючей нагрузки для помещения приняты типовые по прил. 2 [4] «Зал; ДВП + ткань + дерево с покрытием» (рис. 2):

- низшая теплота сгорания: 16200 кДж/кг;
- удельная скорость выгорания: 0,0123 кг/м<sup>2</sup>·с;
- удельное дымовыделение: 175,6 Нп·м<sup>2</sup>/кг;
- удельное выделение углекислого газа: 0,817 кг/кг;
- удельное выделение угарного газа: 0,041 кг/кг;
- удельное выделение хлороводорода: 0,014 кг/кг;

- удельное потребление кислорода: 1,574 кг/кг;
- линейная скорость распространения пламени: 0,0293 м/с.

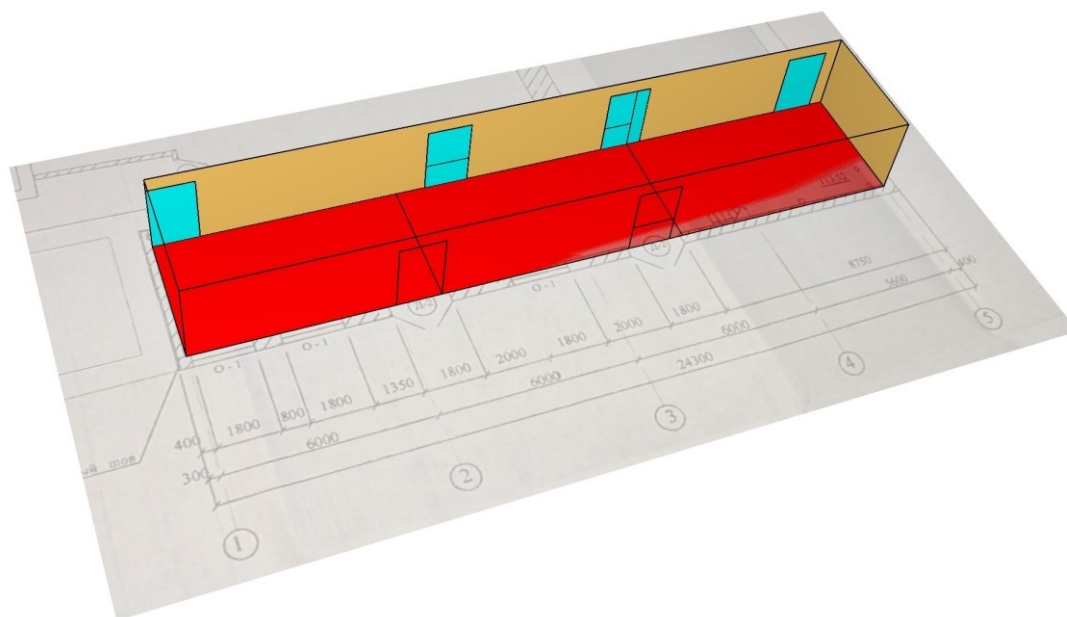


Рис. 2. Размещение горючей нагрузки – по всей площади помещения

Записи FDS:

```
&SPEC ID = 'MY_FUEL', MW = 87.19306/
```

```
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID='MY_AIR', BACKGROUND=.TRUE.
SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=1,
SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=3.7619/
```

```
&SPEC ID='MY_PRODUCTS',
SPEC_ID(1)='SOOT', VOLUME_FRACTION(1)= 0.1464,
SPEC_ID(2)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(2)= 1.6173,
SPEC_ID(3)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)= 0.1275,
SPEC_ID(4)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(4)=0.0342,
SPEC_ID(5)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(5)= 8.1315,
SPEC_ID(6)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(6)= 16.1209/
```

```
&REAC ID='Зал;0,5*ДВП+0,1*(ткань, искожа ПВХ, ППУ)+0,2*дерево с покрытием',
  FUEL='MY_FUEL', HEAT_OF_COMBUSTION=16200,
  SPEC_ID_NU='MY_FUEL', 'MY_AIR', 'MY_PRODUCTS', NU=-1, -4.2853,1,
  REAC_MASS_ERROR=1/
```

```
&SURF ID='Зал; ДВП+ткань+дерево с покрытием',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=199.0/
```

```
&VENT ID='Вентиляционное отверстие', SURF_ID='Зал; ДВП+ткань+дерево с
  покрытием', XB=-1.776357E-15,24.5,-2.220446E-16,4.5,-8.881784E-16,-
  8.881784E-16, SPREAD_RATE=5.5E-3, XYZ=12.25,2.25,-8.881784E-16/
```

### *Величины и плоскости измерения*

Для анализа температурного воздействия на исследуемую конструкцию во время пожара при моделировании производится замер среднеобъемной температуры воздуха в помещении очага пожара, а также (для более приближенного анализа воздействия температуры на перекрытие) температура в припотолочном слое в центре помещения (месте возникновения горения) (рис. 3).

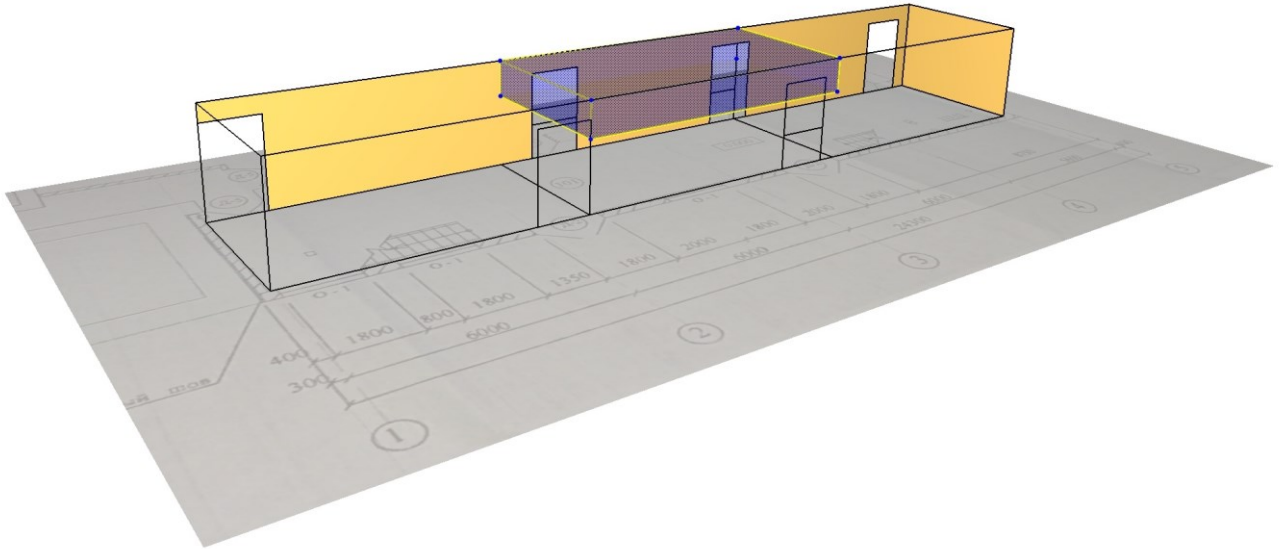


Рис. 3. Границы замера температуры воздуха в припотолочном слое.

Для визуализации динамики температуры также производится замер температуры газовой среды в продольном сечении помещения:

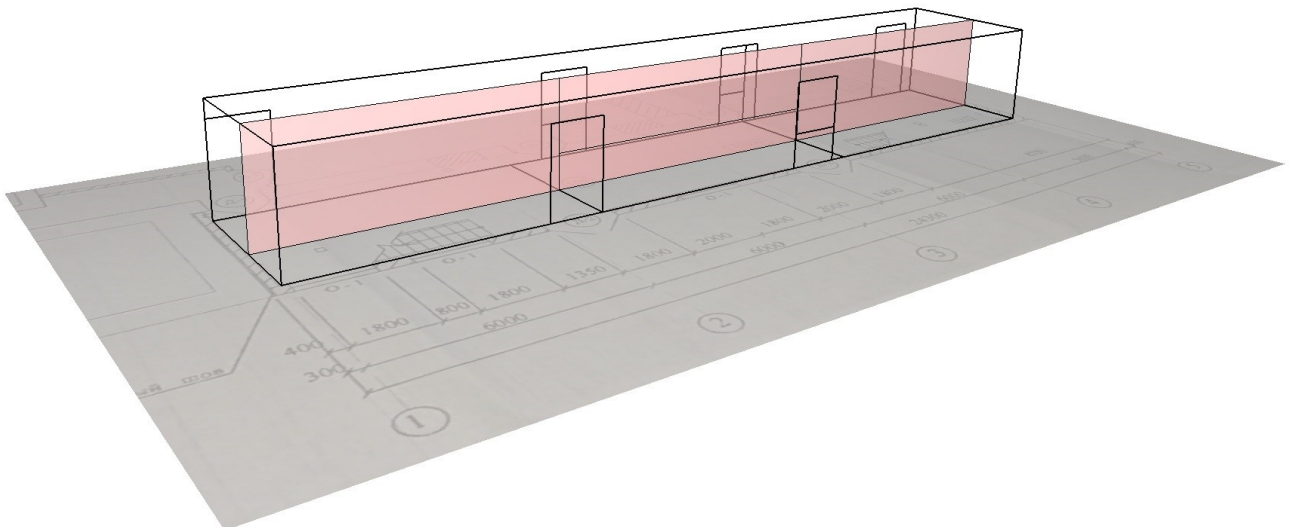


Рис. 4. Границы замера температуры воздуха в припотолочном слое.

### *Результаты моделирования пожара*

Динамика опасных факторов пожара и графики изменения среднеобъемной температуры представлены на рис. 5 – рис. 26 и в таблице 1.

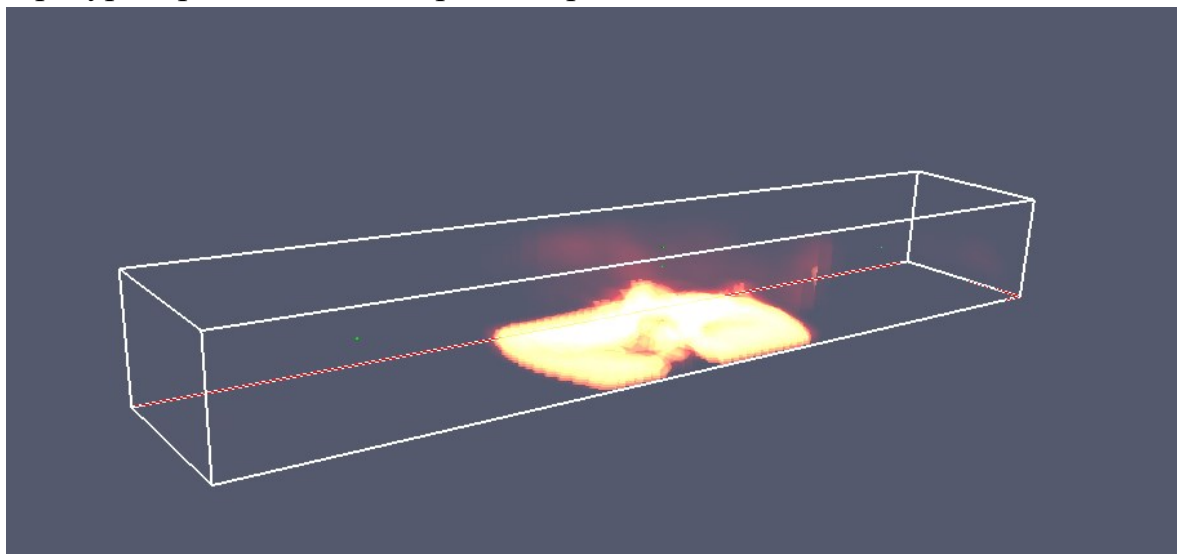


Рис. 5. Область помещения с мощностью тепловыделения более  $80 \text{ кВт/м}^3$  на момент времени 2 минуты

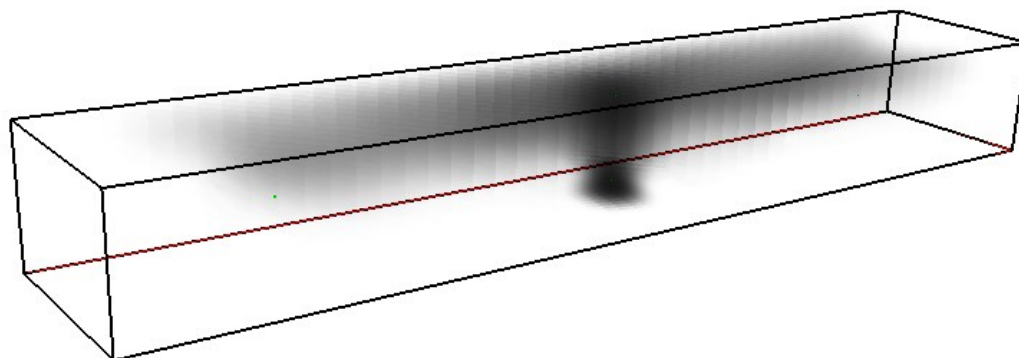


Рис. 6. Оптическая плотность дыма в начальной стадии пожара

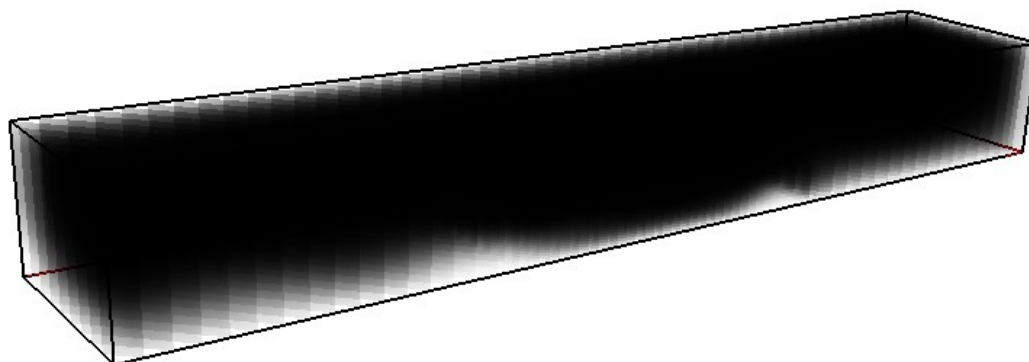


Рис. 7. Оптическая плотность дыма на момент 5 мин.



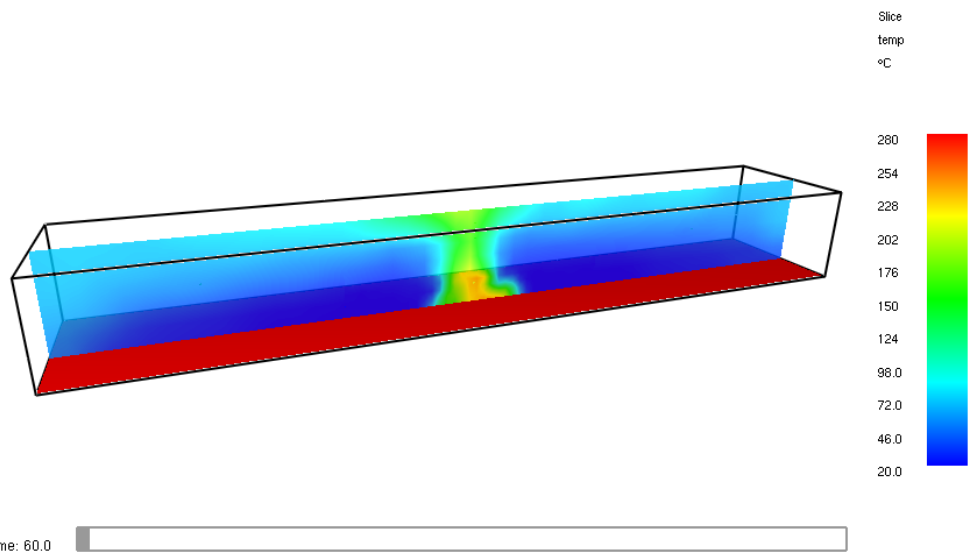


Рис. 8. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 1 мин.

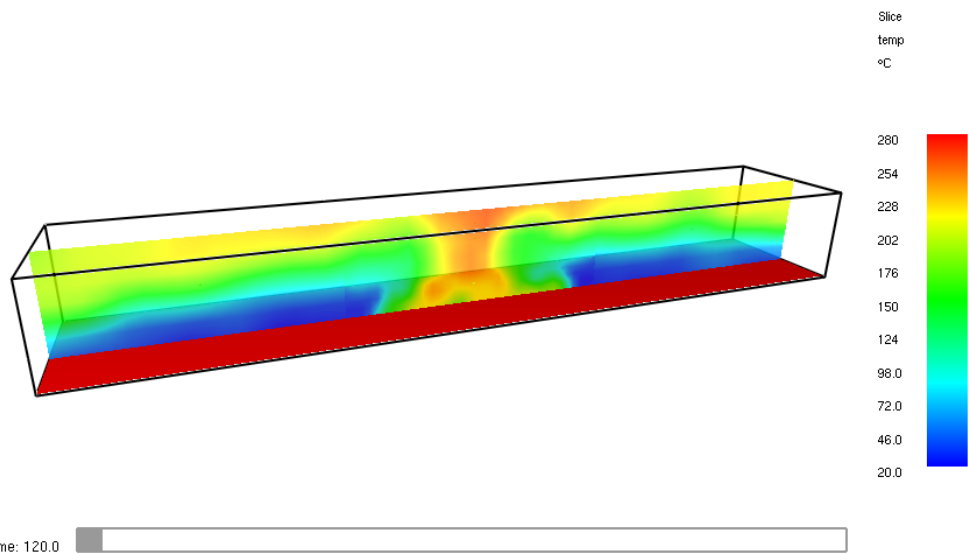


Рис. 9. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 2 мин.

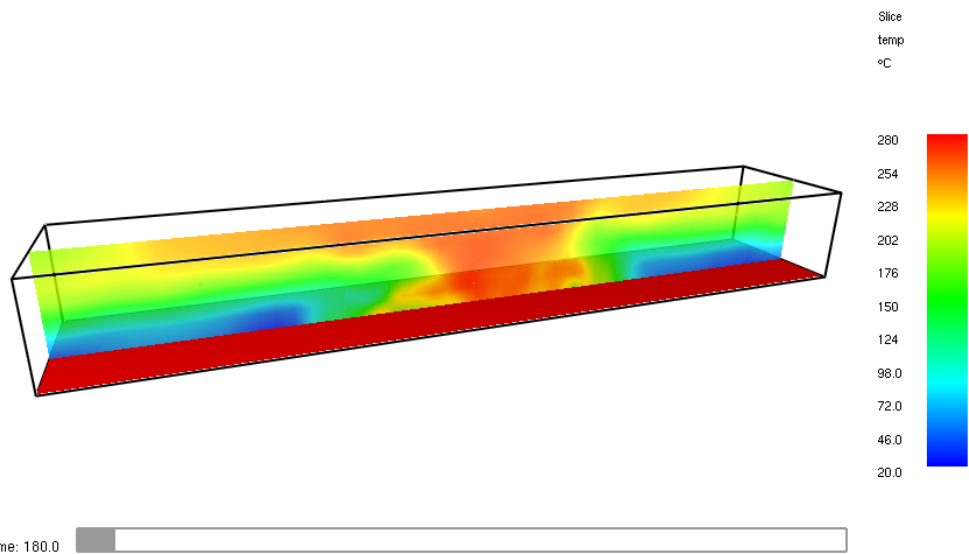


Рис. 10. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 3 мин.

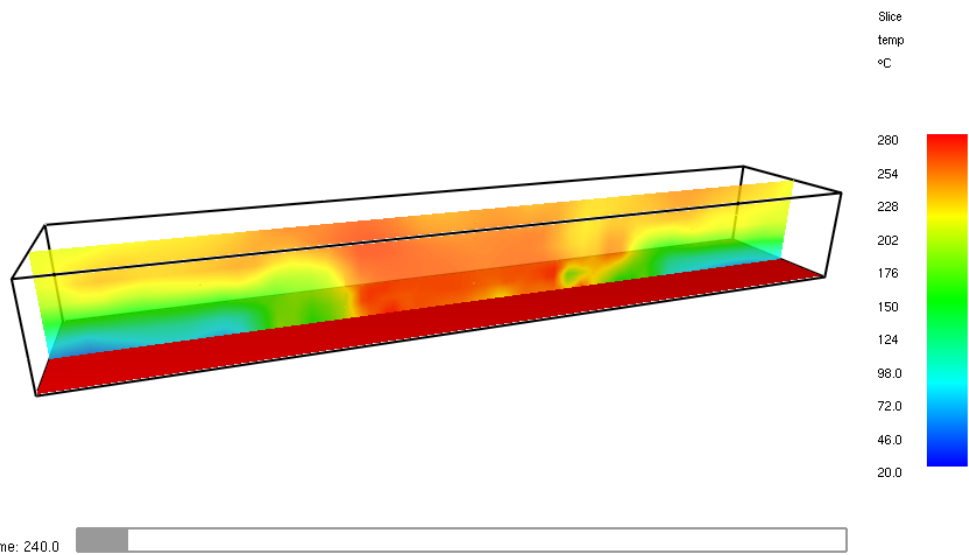


Рис. 11. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 4 мин.

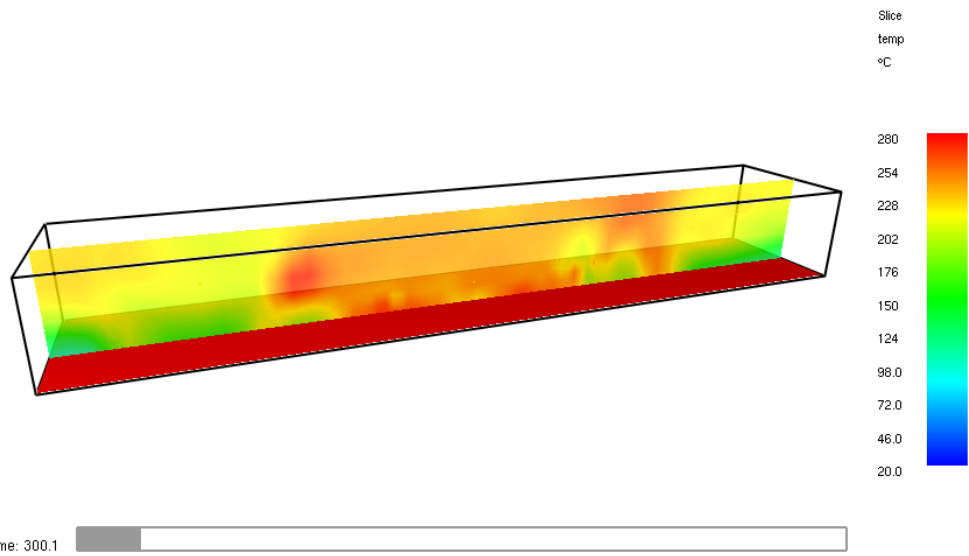


Рис. 12. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 5 мин.

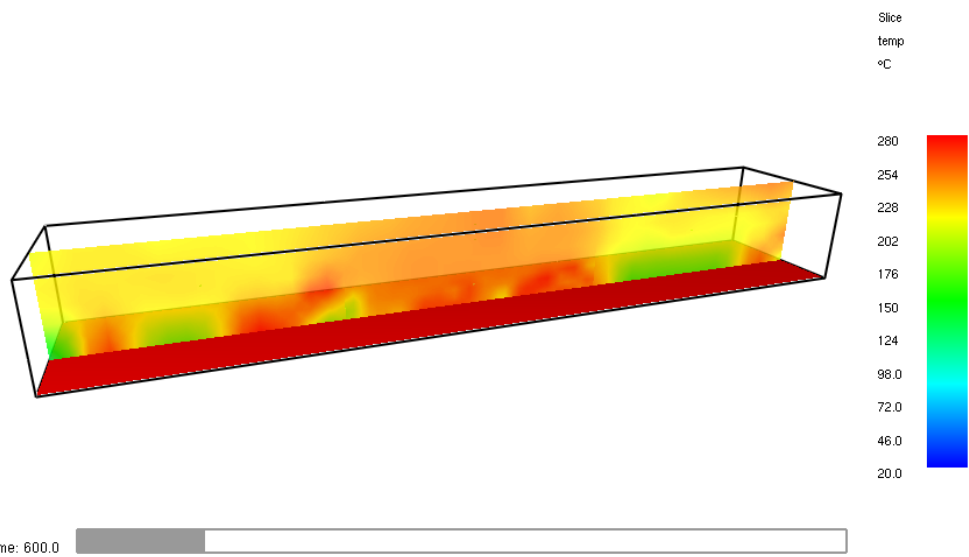


Рис. 13. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 10 мин.

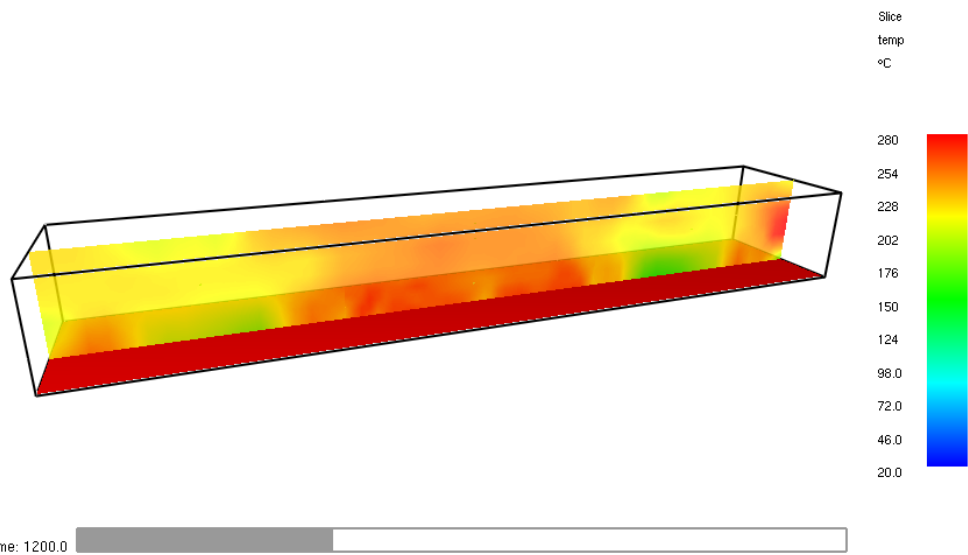


Рис. 14. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 20 мин.

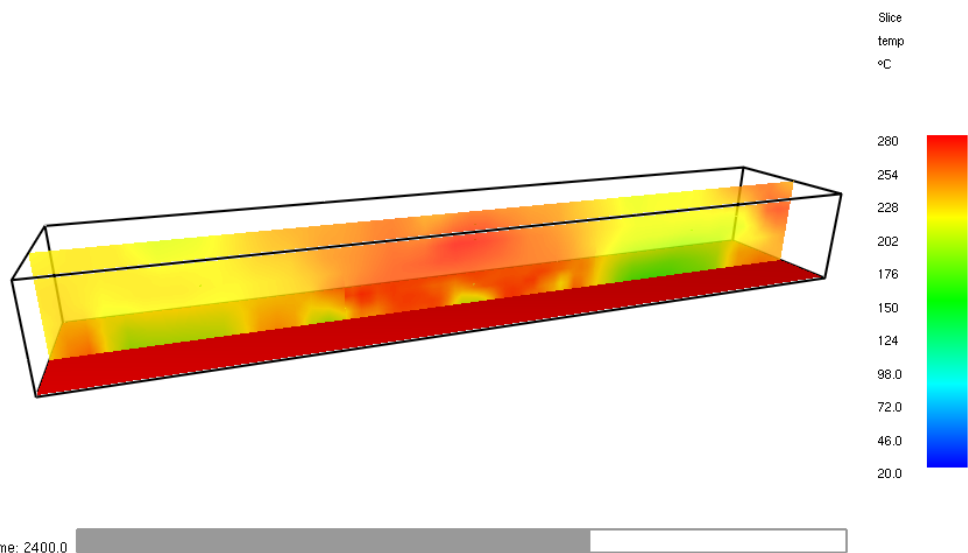


Рис. 15. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 40 мин.

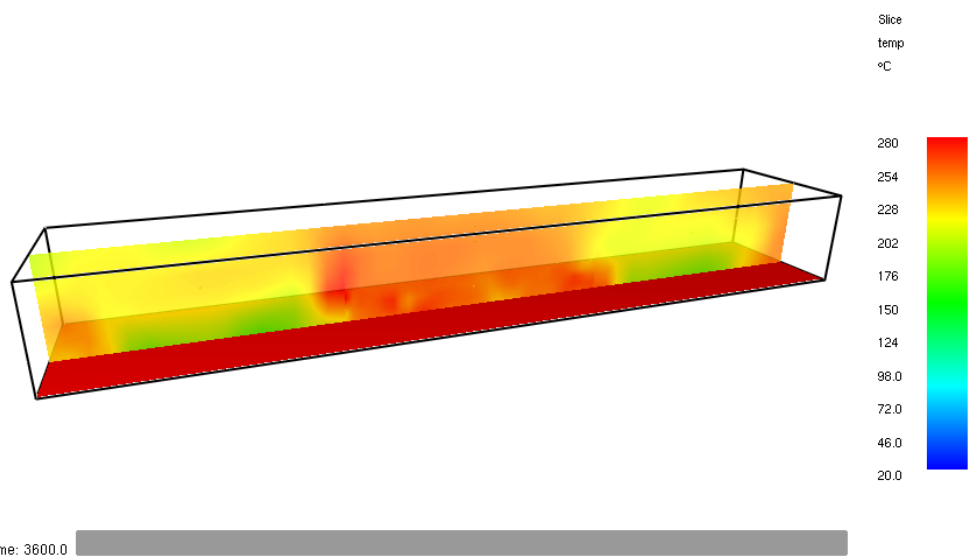


Рис. 16. Температура газовой среды в продольном сечении помещения на момент 60 мин.

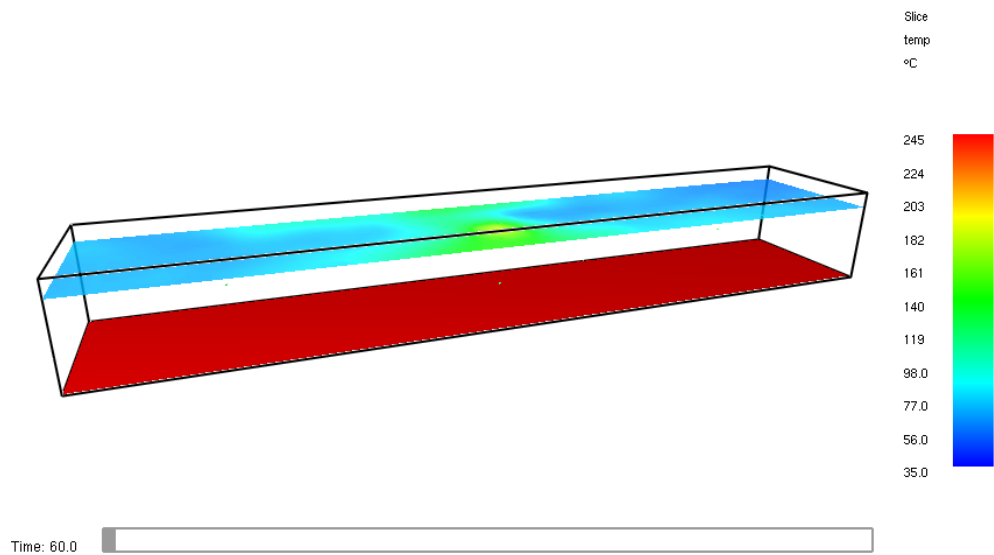


Рис. 17. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 1 мин.

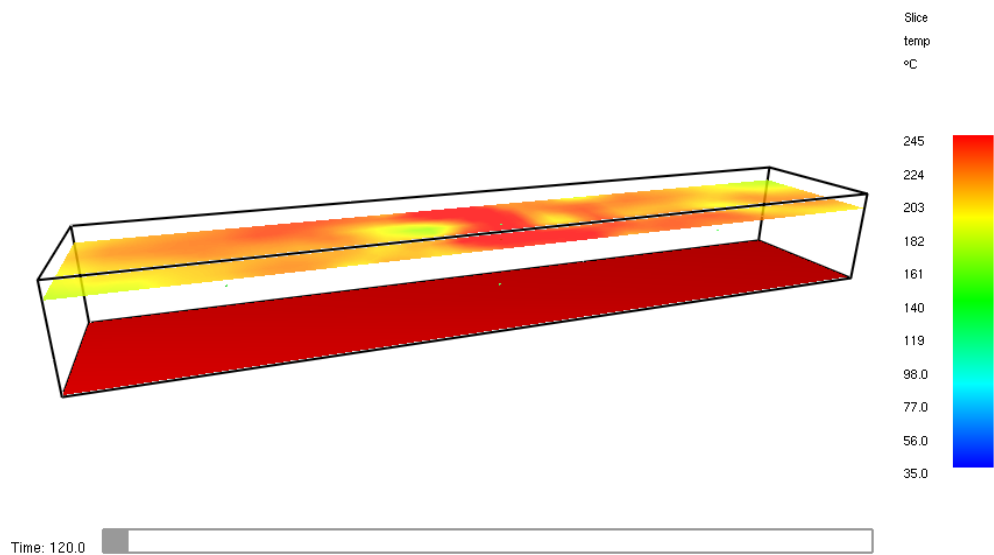


Рис. 18. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 2 мин.

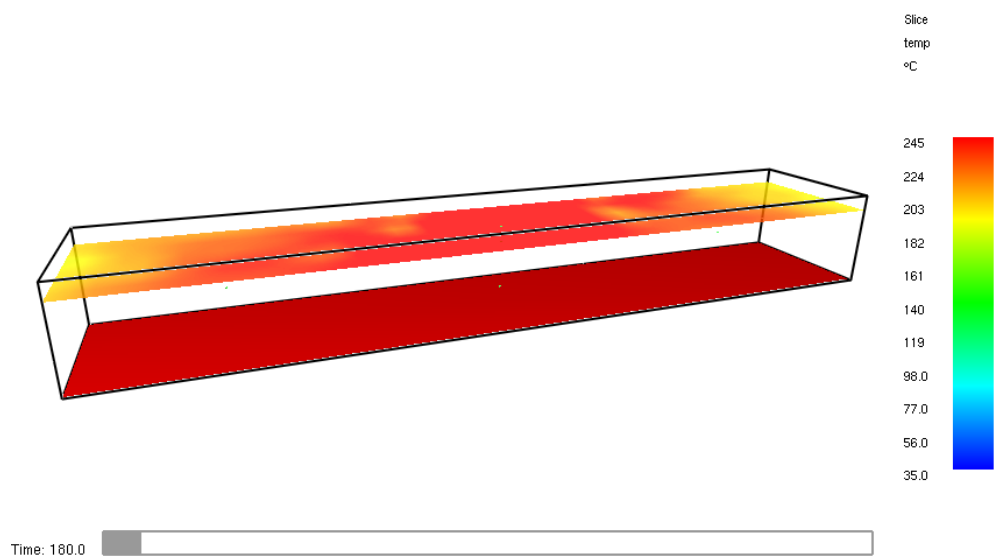


Рис. 19. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 3 мин.

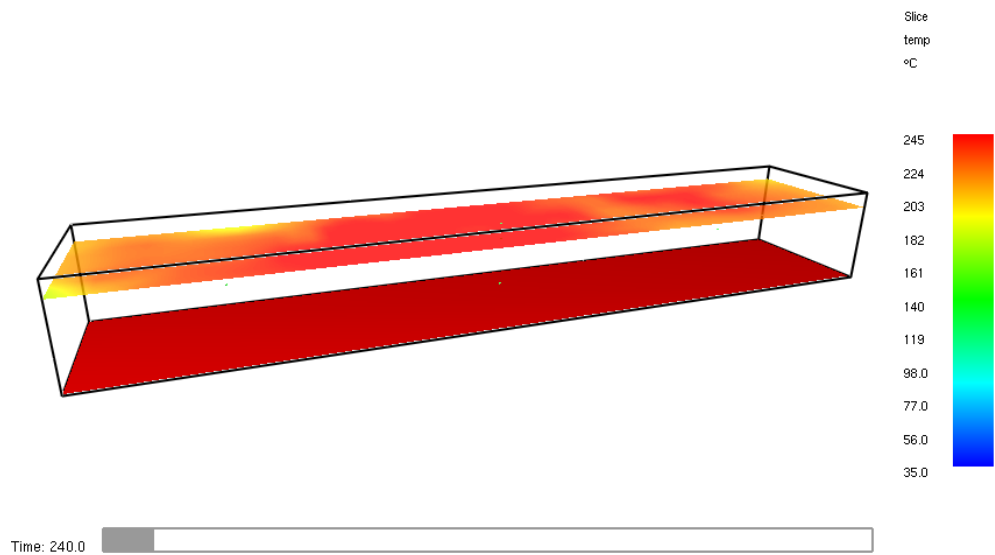


Рис. 20. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 4 мин.

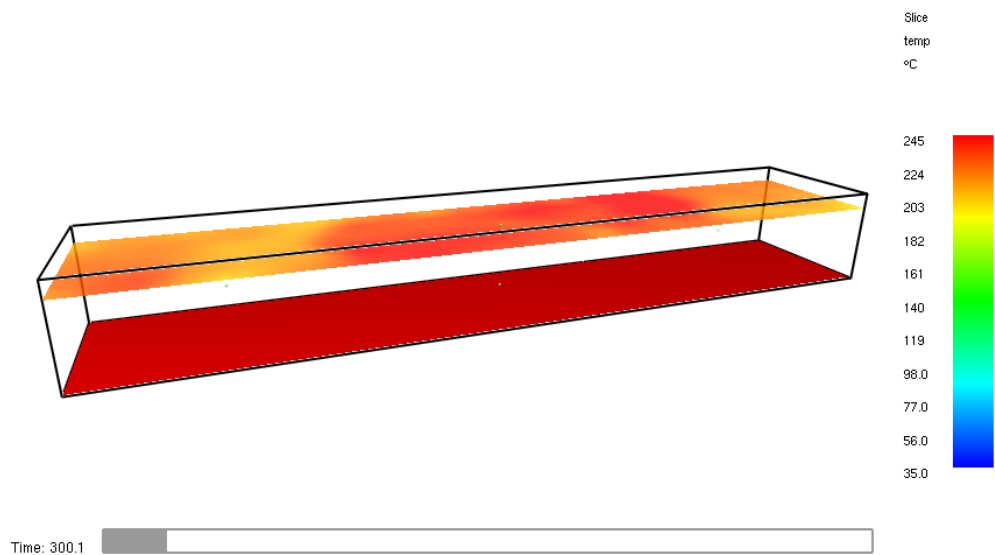


Рис. 21. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 5 мин.

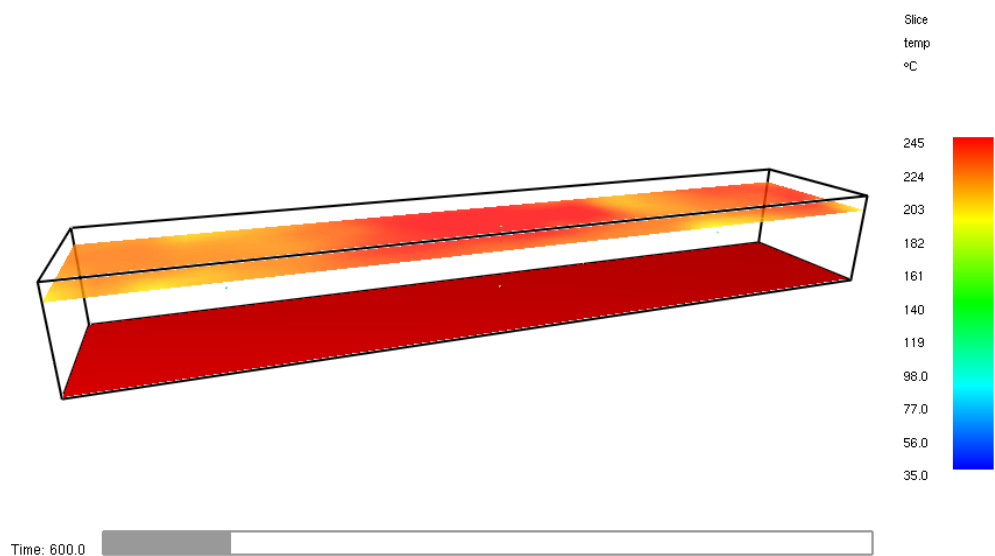


Рис. 22. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 10 мин.

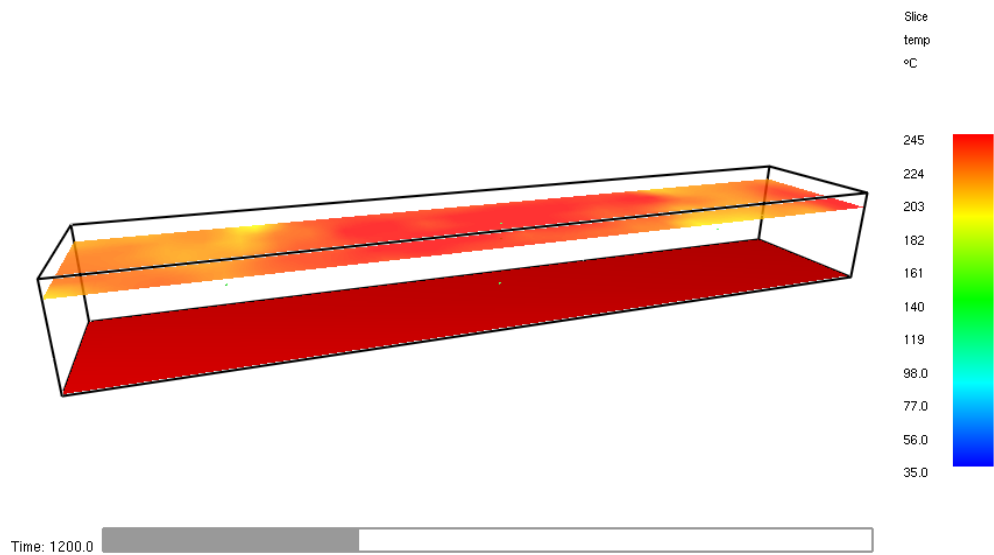


Рис. 23. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 20 мин.

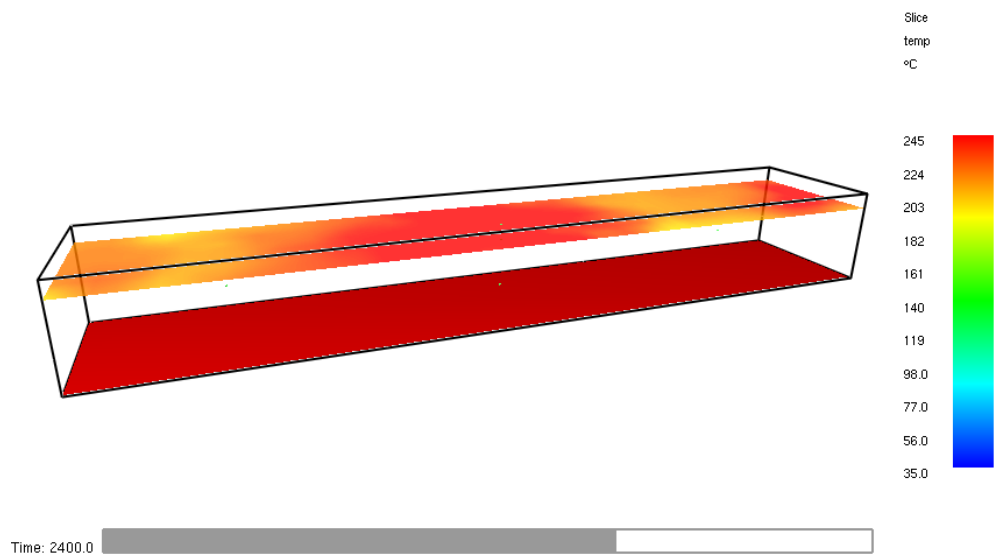


Рис. 24. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 40 мин.

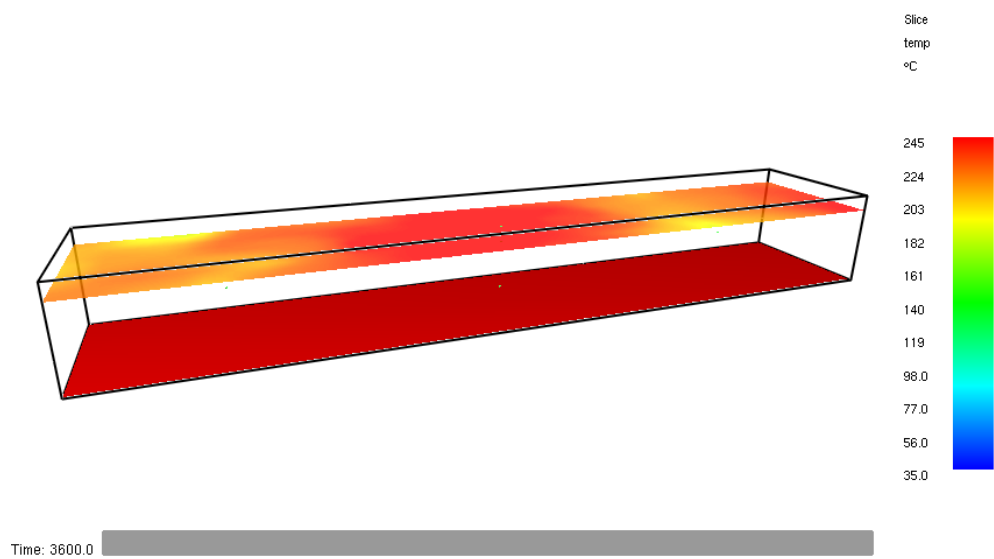


Рис. 25. Температура газовой среды в припотолочном слое на момент 60 мин.

Таблица 1. Динамика температуры в помещении

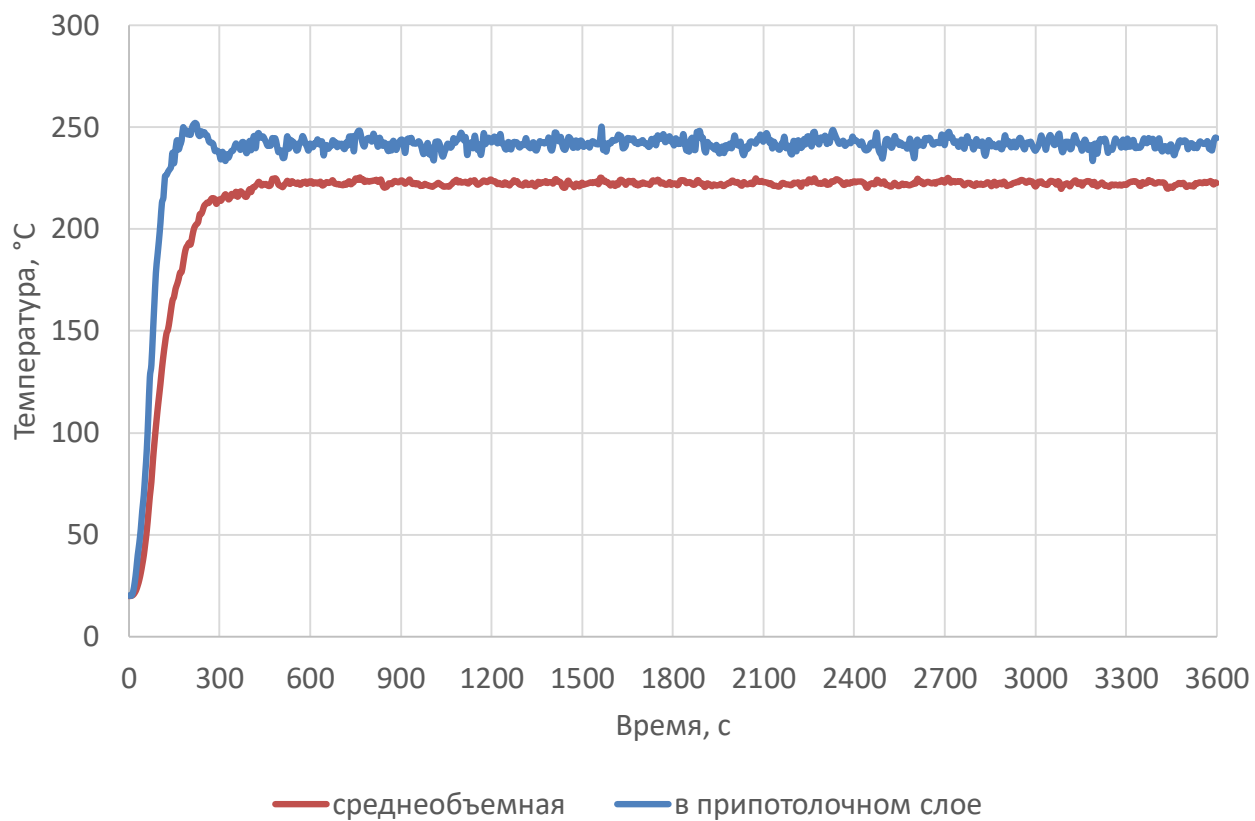


Рис. 26. Динамика температуры газовой среды в помещении по результатам моделирования с учетом фактической горючей нагрузки

Для моделирования прогрева перекрытия с конструктивной огнезащитой температуру воздуха принимаем по температуре в припотолочном слое, которая выше температуры, усредненной по объему всего помещения.



## 2. Моделирование прогрева перекрытия

### Общие сведения

В теплотехнической части расчета производится моделирование прогрева перекрытия в результате конвективного теплообмена и теплообмена излучением при горении фактической горючей нагрузки.

Граничные условия задачи описываются лучистым и конвективным теплообменом поверхности конструкции с окружающей средой:

$$-\lambda \text{grad}T = \alpha_k(T - T_s) + \varepsilon_{\text{пр}}\sigma(T^4 - T_s^4),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала конструкции, Вт/(м·К);

$\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «обогревающая среда – поверхность конструкции»;

$\sigma$  – постоянная Стефана - Больцмана;

$T, T_s$  – температуры газовой фазы и поверхности конструкции, К.

Приведенная степень черноты системы «среда – поверхность конструкции» рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{эф}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{пов}}} - 1},$$

где  $\varepsilon_{\text{эф}}$  – эффективная степень черноты продуктов горения;  $\varepsilon_{\text{пов}}$  – степень черноты поверхности конструкции.

### Модель перекрытия

Рассматриваемое перекрытие (рис. 27) состоит из швеллеров 18аУ (1), сдвоенных, длиной, равной ширине помещения, уложенных с шагом 2,96 м. К швеллерам перпендикулярно крепится брус (2) деревянный размерами 5×15 мм длиной 2,96 м. К брусу сверху и снизу крепятся деревянные доски (3) толщиной 15 мм, шириной 180 мм, длиной 2 м. Между деревянными досками и бруском (в образованных прямоугольных ячейках) уложен паробарьер с минватой (4). Сверху уложены листы OSB (5) размерами 2,5×1,25 м, толщиной 22 мм. Сверху OSB уложен линолеум.

Огнезащита перекрытия выполнена листами ГКЛО (KNAUF-DF) толщиной 12,5 мм (6).

Тепловые свойства материалов, применяемые в расчете.

Сталь [5]:

– плотность 7850 кг/м<sup>3</sup>;

– теплопроводность 58 Вт/(м·К);

– теплоемкость 482 кДж/(кг·К).

Древесина (сосна) [5]:

– плотность 500 кг/м<sup>3</sup>;

– теплопроводность 0,18 Вт/(м·К);

– теплоемкость 2300 кДж/(кг·К).

Лист ГКЛО [5, 6]:

– плотность 850 кг/м<sup>3</sup>;

– теплопроводность 0,22 Вт/(м·К);

– теплоемкость 840 кДж/(кг·К).

Лист OSB [5]:

– плотность 650 кг/м<sup>3</sup>;

– теплопроводность 0,15 Вт/(м·К);

– теплоемкость 2300 кДж/(кг·К).

Минвата [5, «Маты минераловатные прошивные»]:

– плотность 50 кг/м<sup>3</sup>;

– теплопроводность 0,056 Вт/(м·К);

– теплоемкость 840 кДж/(кг·К).

Наличием линолеума, уложенного поверх листов OSB на необогреваемой поверхности перекрытия, в теплотехническом расчете пренебрегается.

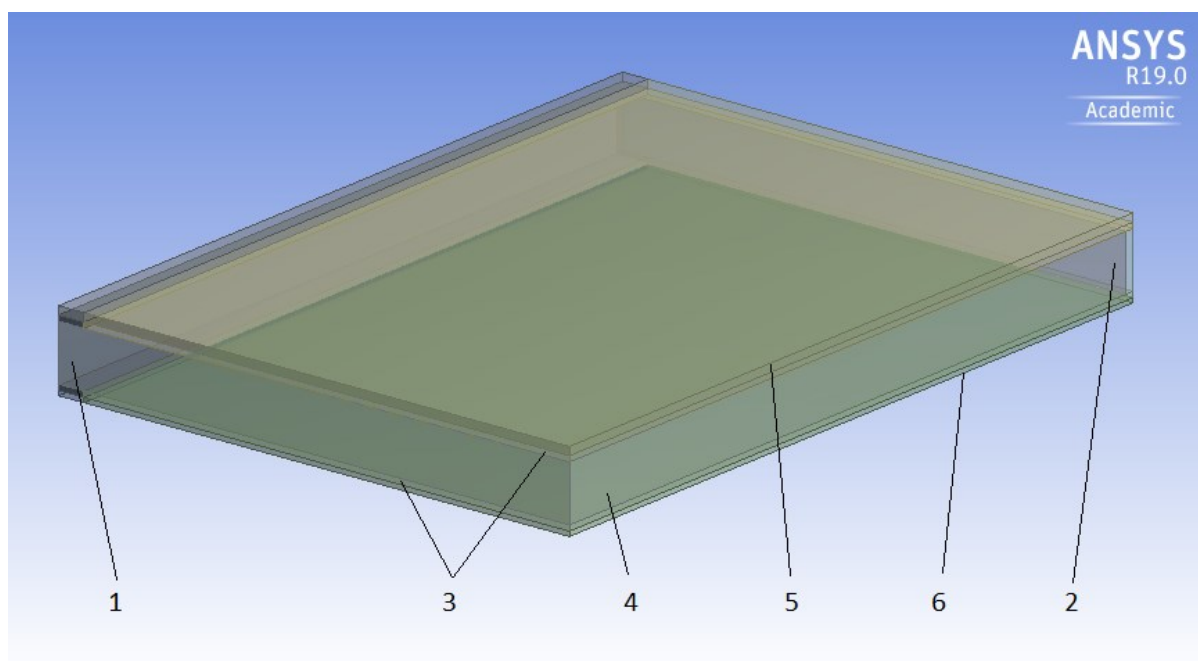


Рис. 27. Часть модели перекрытия

Описанная модель теплообмена и характеристики материалов реализованы в программном комплексе ANSYS Mechanical 19.0 Academic.

## Результаты расчета

Поля температуры на момент времени 45 минут, графики максимальной температуры, а также значения максимальной и средней температуры в конструктивных элементах перекрытия по результатам моделирования конвективного теплообмена и теплообмена излучением приведены на рис. 28 – рис. 35 и в таблицах 2–8.

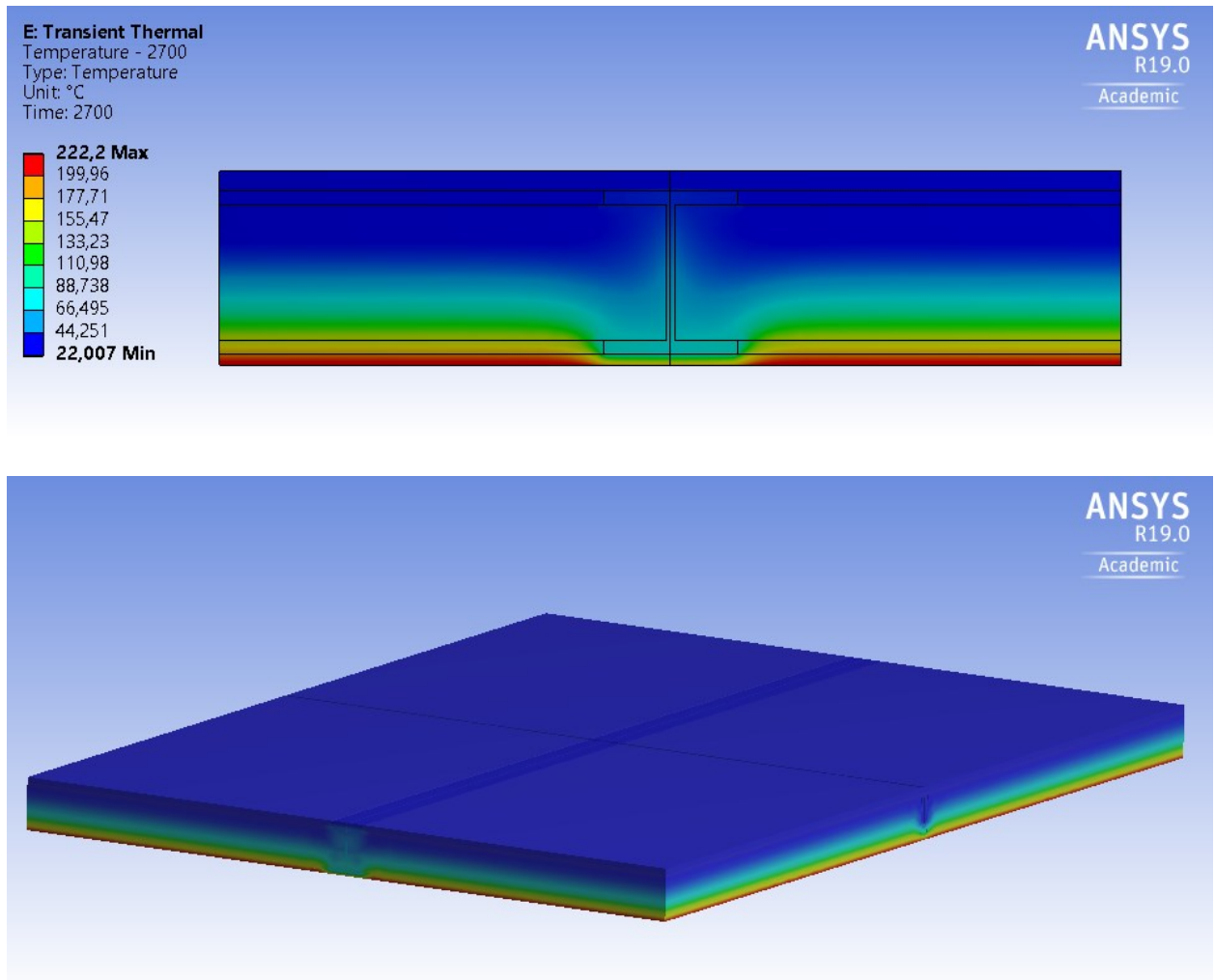


Рис. 28. Поле температуры в сечении перекрытия на момент времени 45 мин.

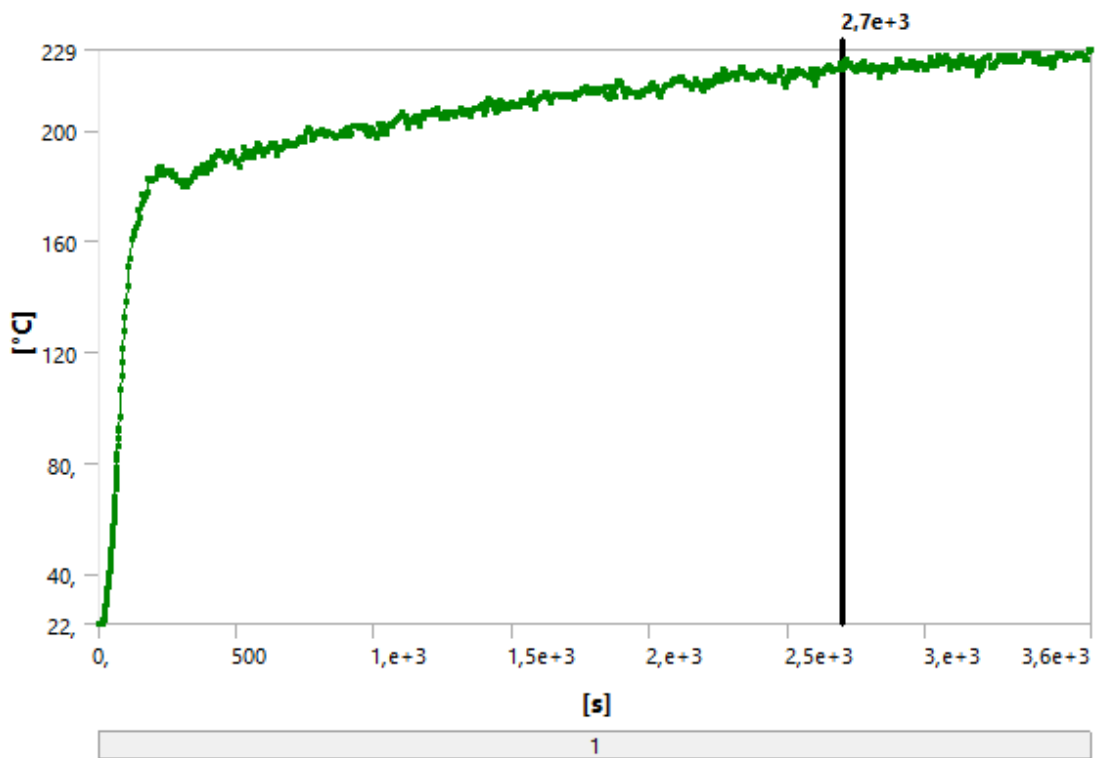
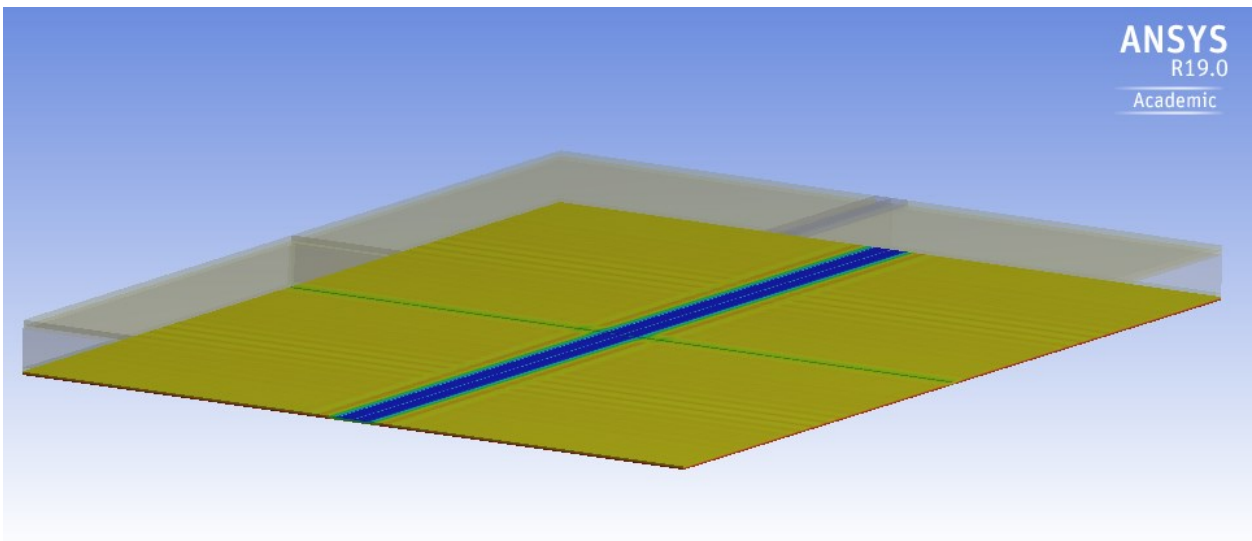
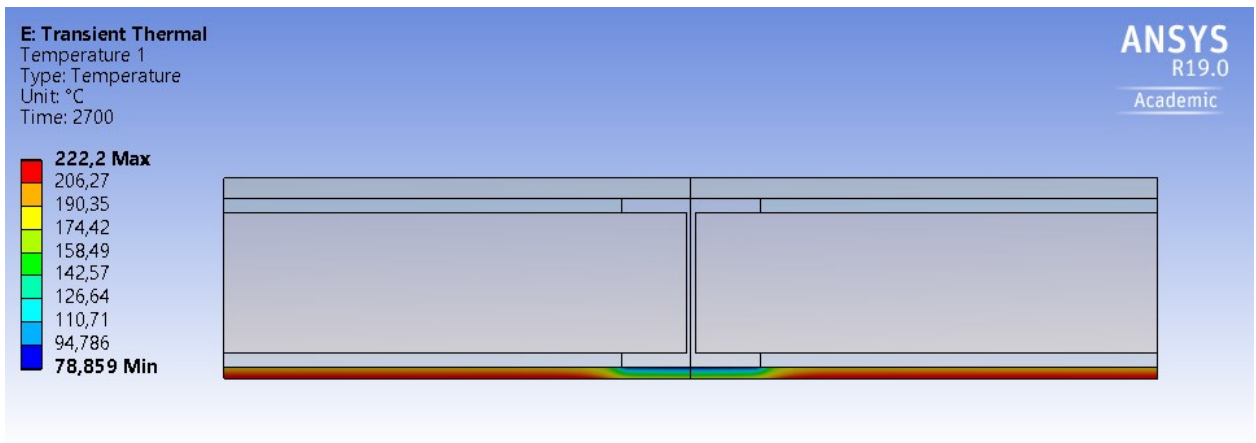


Рис. 29. Лист ГКЛЮ

Таблица 2. Температура листа ГКЛЮ

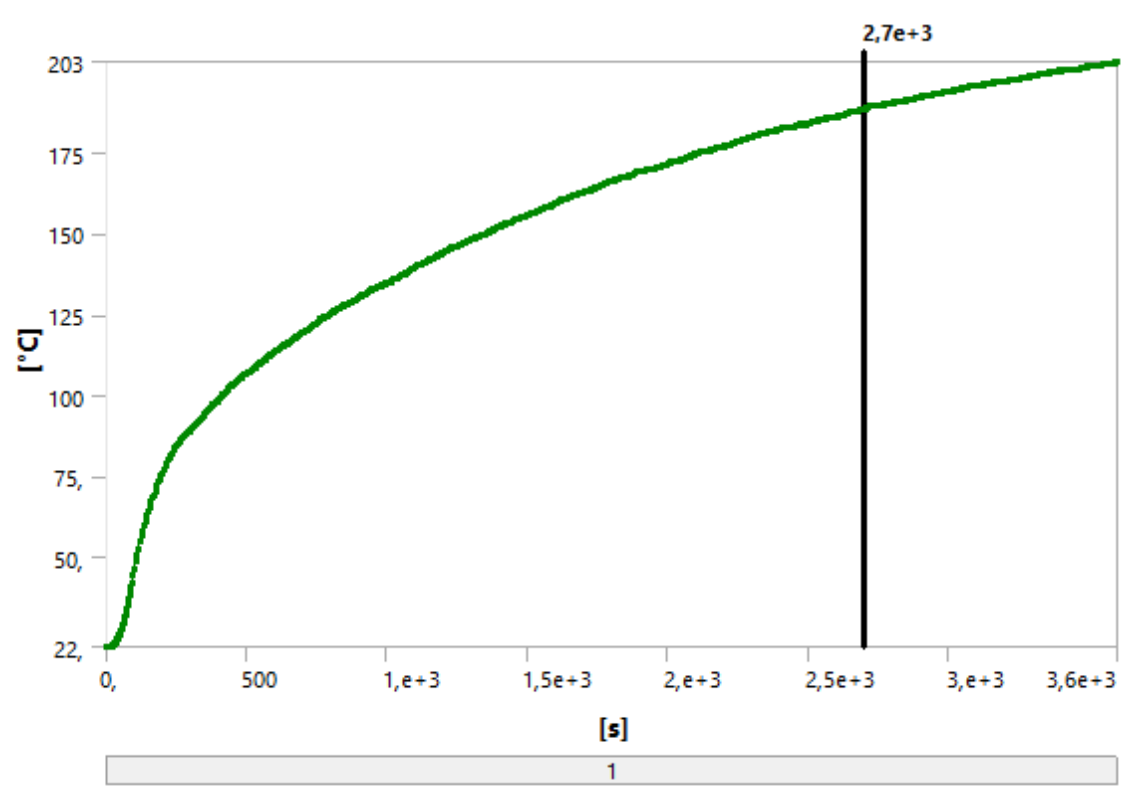
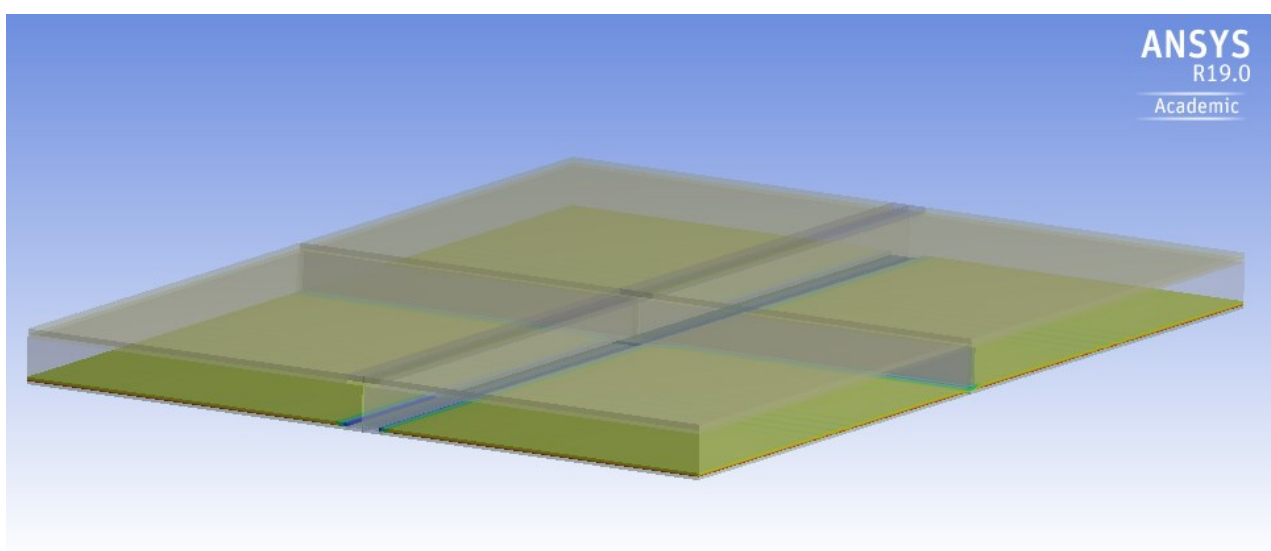
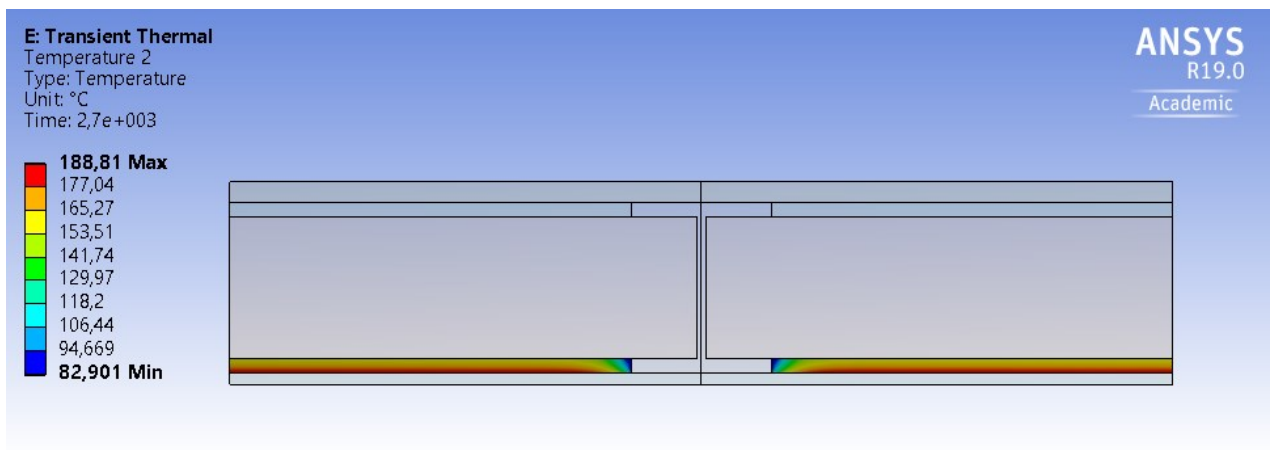


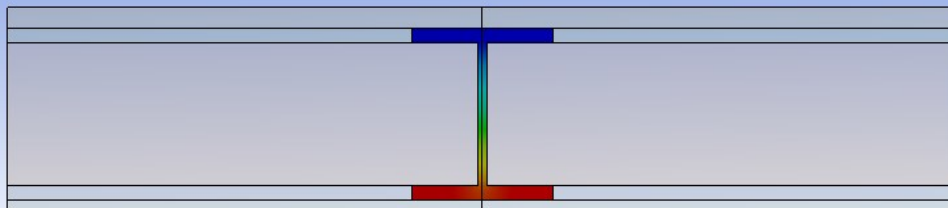
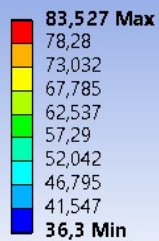
Рис. 30. Доска под брусом

Таблица 3. Температура доски под брусом

**E: Transient Thermal**

Temperature 3  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 2700

**ANSYS**  
R19.0  
Academic



**ANSYS**  
R19.0  
Academic

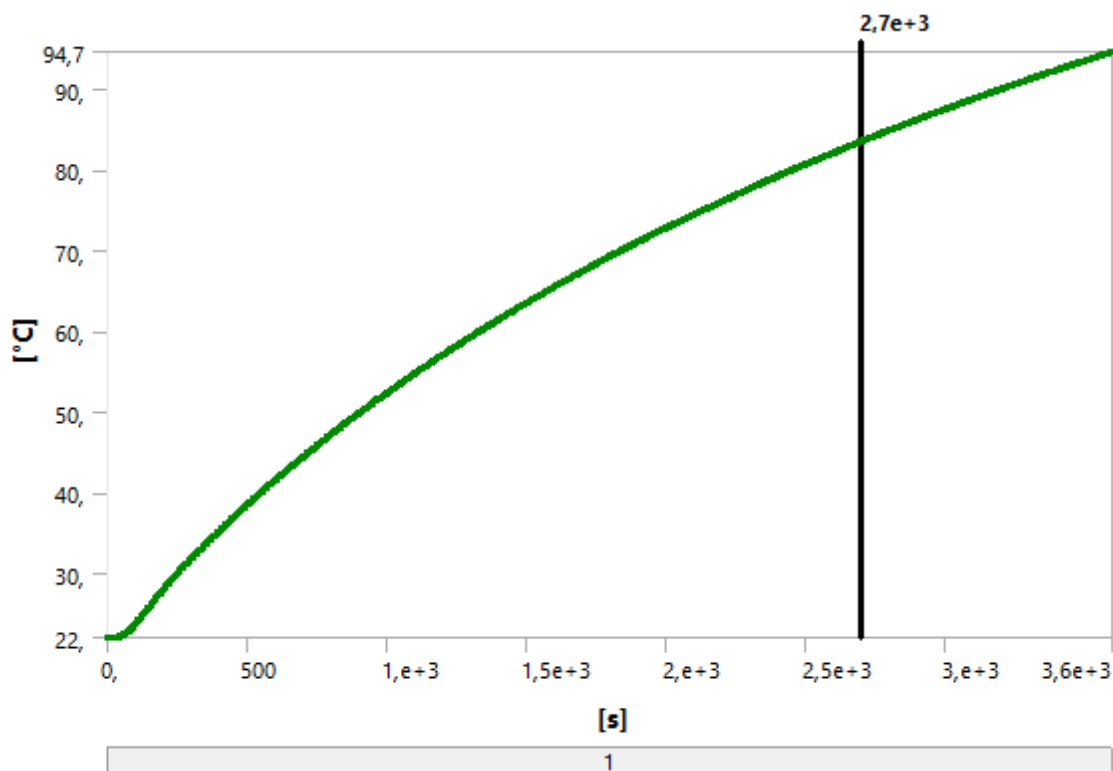
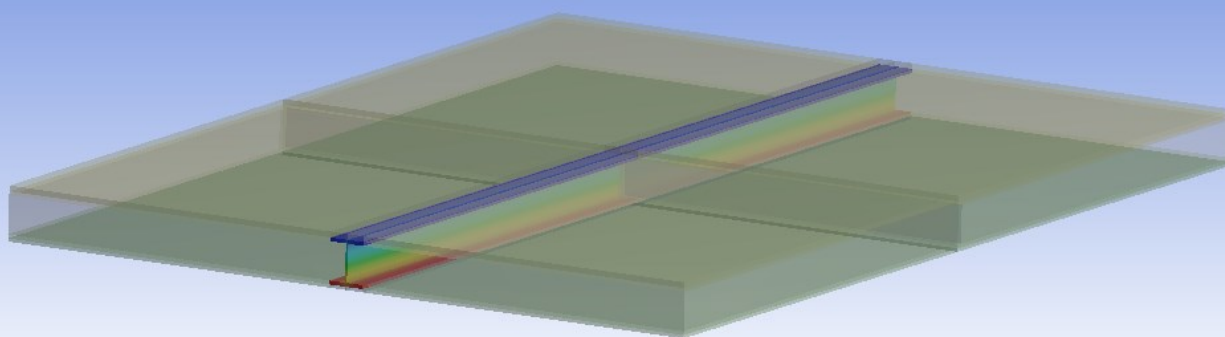


Рис. 31. Балка (швеллер сдвоенный)

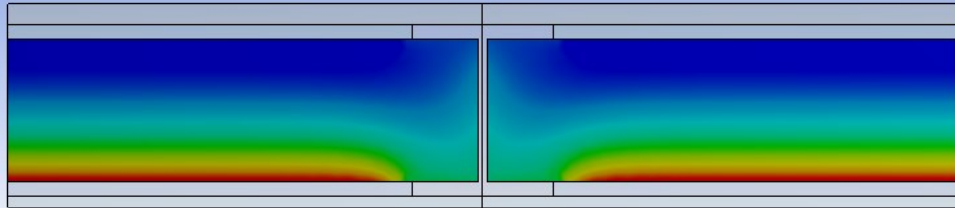
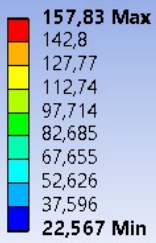


Таблица 4. Температура балки

**E: Transient Thermal**

Temperature 7  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 2700

**ANSYS**  
R19.0  
Academic



**ANSYS**  
R19.0  
Academic

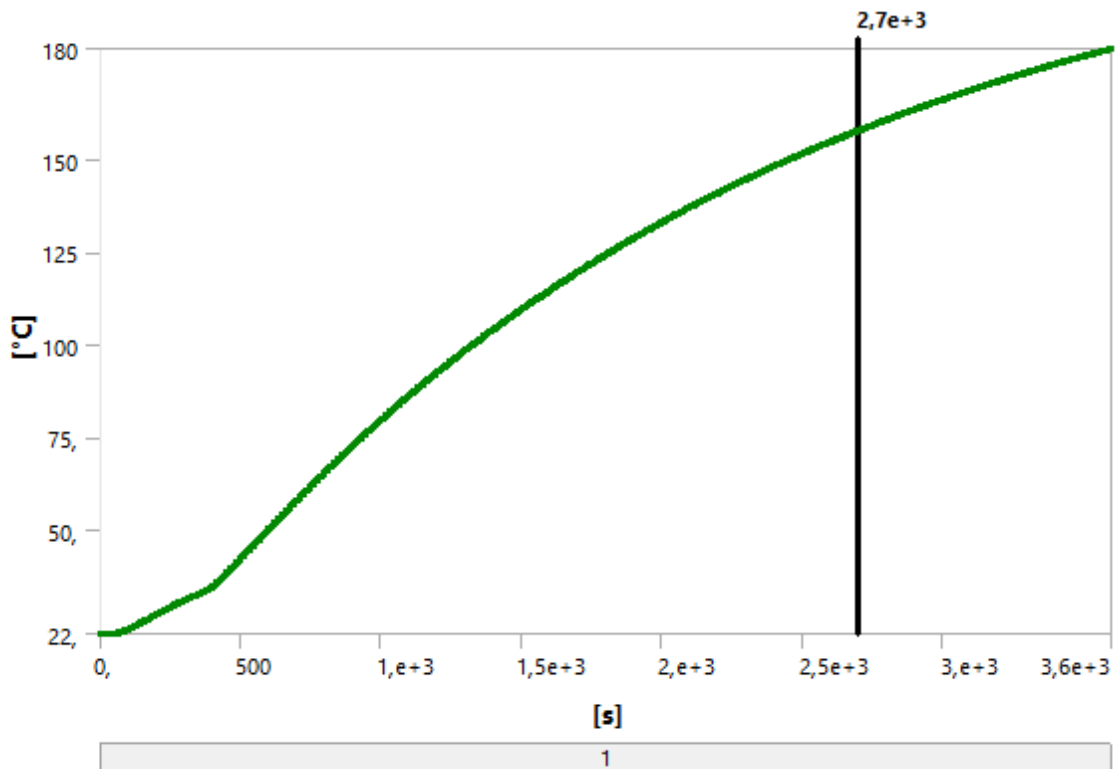
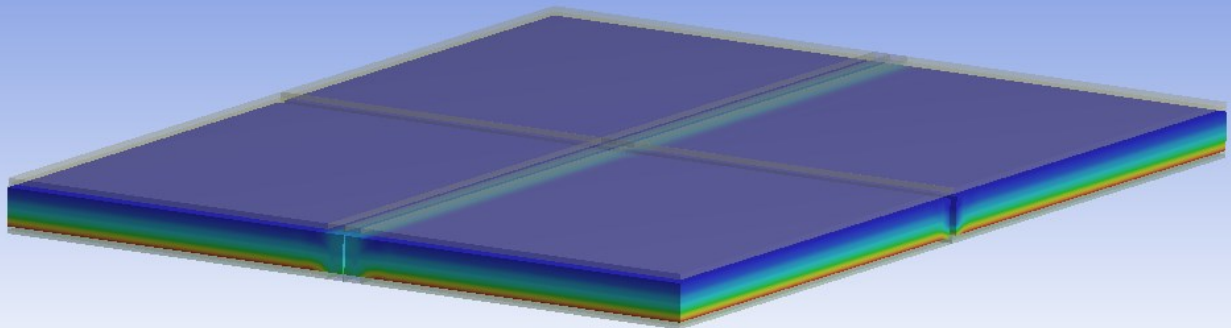


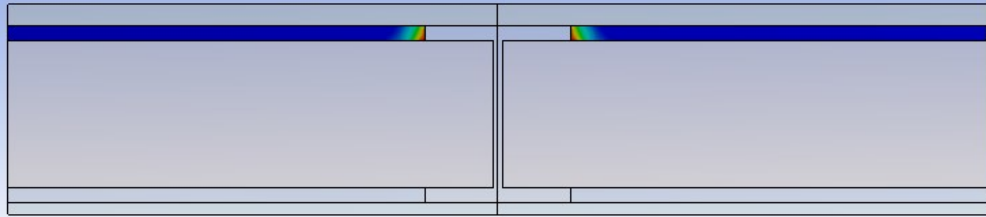
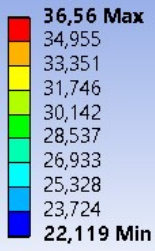
Рис. 32. Минвата

Таблица 5. Температура заполнения из минеральной ваты

**E: Transient Thermal**

Temperature 4  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 2700

**ANSYS**  
R19.0  
Academic



**ANSYS**  
R19.0  
Academic

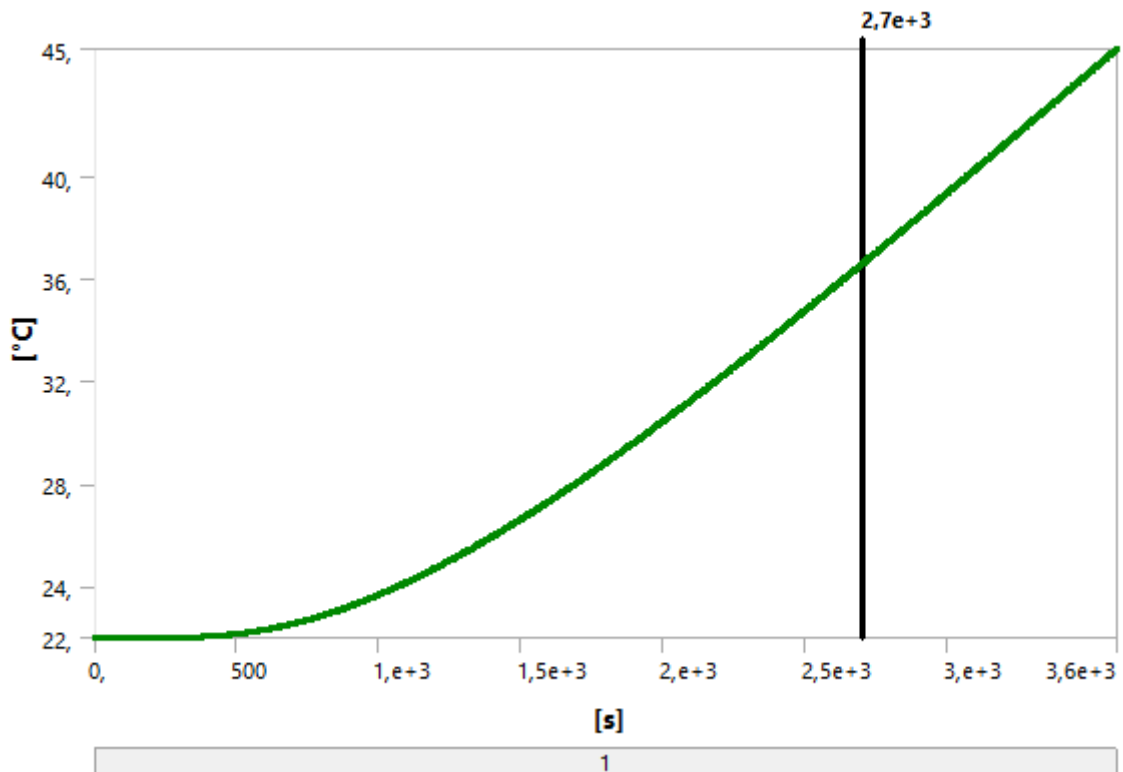
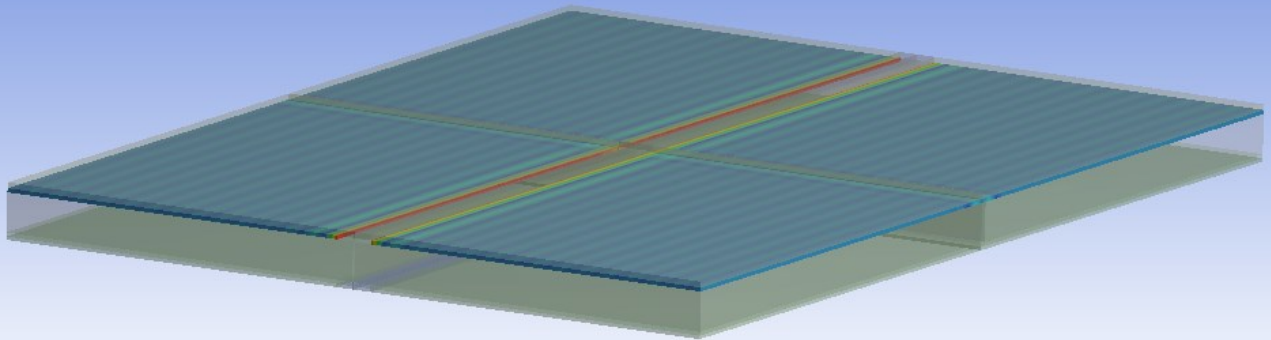


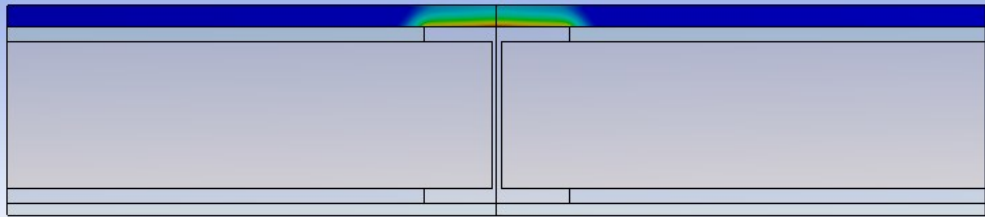
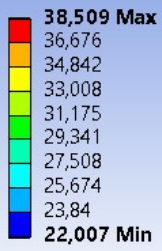
Рис. 33. Доска над брусом

Таблица 6. Температура доски над брусом

**E: Transient Thermal**

Temperature 5  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 2700

**ANSYS**  
R19.0  
Academic



**ANSYS**  
R19.0  
Academic

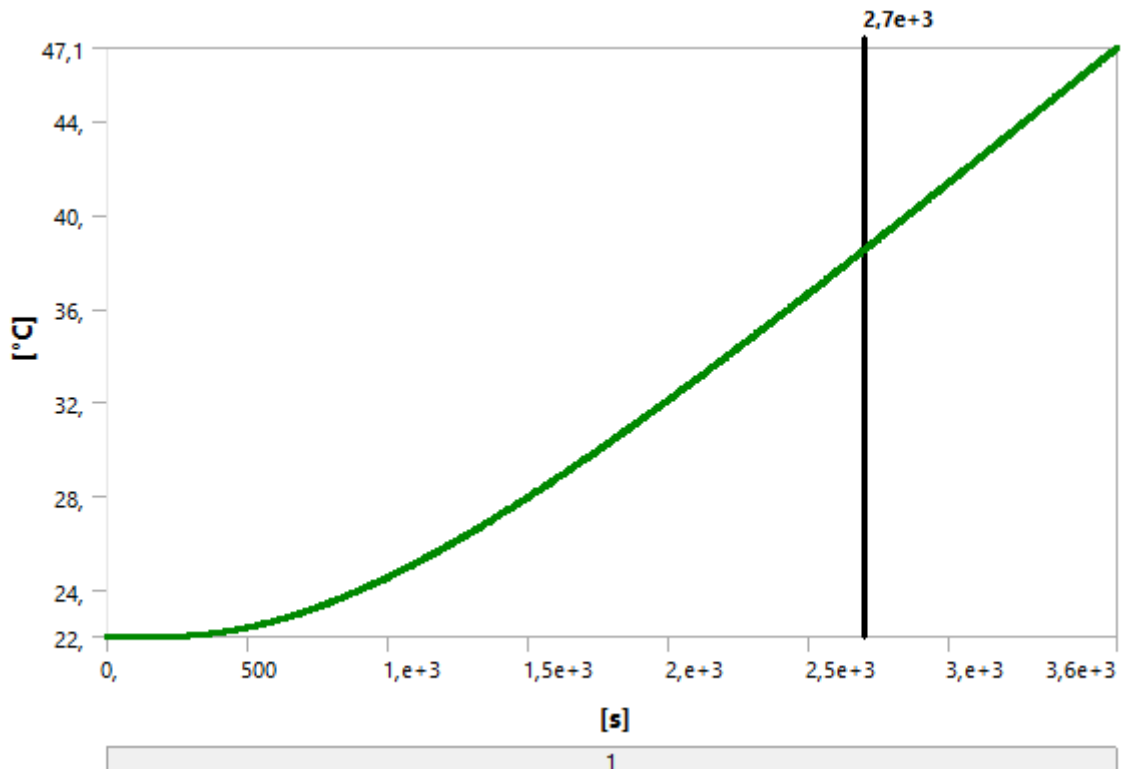
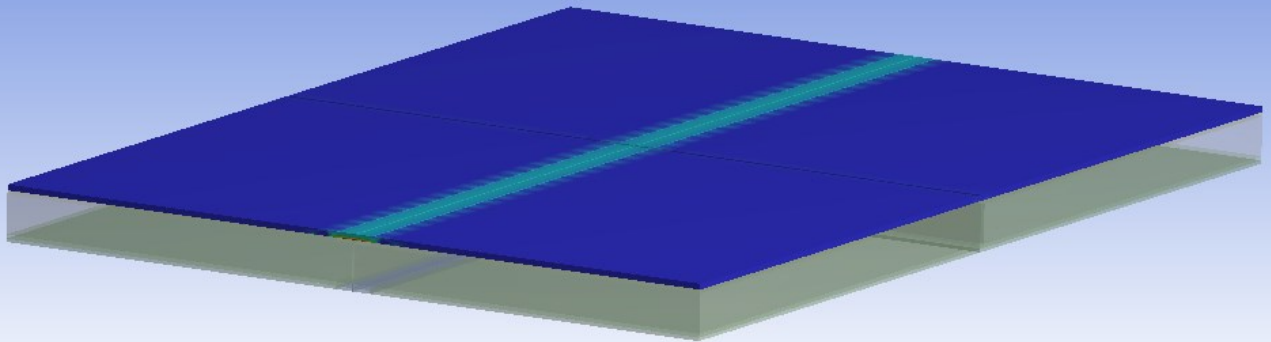
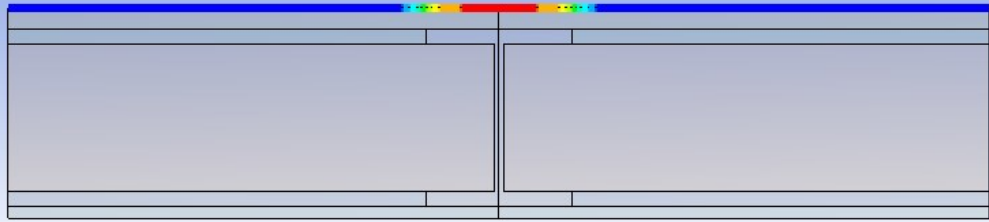
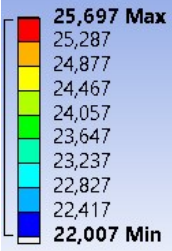


Рис. 34. Лист OSB

Таблица 7. Температура листа OSB

E: Transient Thermal  
Temperature 6  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 2700

ANSYS  
R19.0  
Academic



ANSYS  
R19.0  
Academic

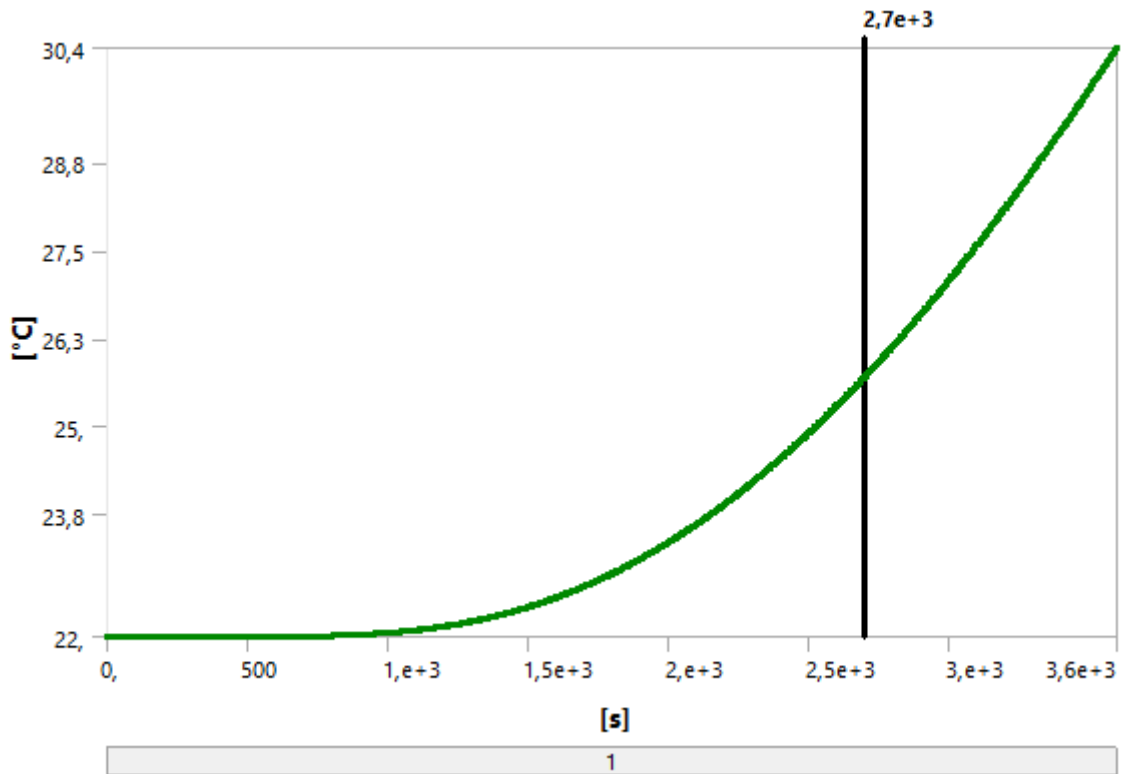
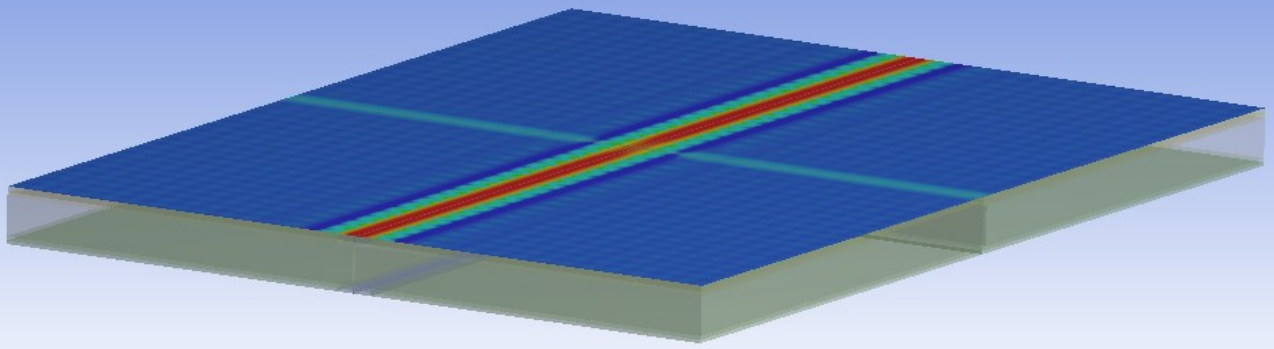


Рис. 35. Верхняя (необогреваемая) поверхность перекрытия



Таблица 8. Температура необогреваемой поверхности перекрытия

### 3. Определение фактического предела огнестойкости

В результате компьютерного моделирования прогрева плиты перекрытия при огневом воздействии от фактической горючей нагрузки получено следующее.

Предельное состояние плиты перекрытия по потере теплоизолирующей способности (I) в результате превышения средней температуры необогреваемой поверхности по ГОСТ 30247.1-94 более чем на 140 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания не достигается (рис. 35).

Предельное состояние плиты перекрытия по потере теплоизолирующей способности (I) в результате превышения температуры в любой точке необогреваемой поверхности по ГОСТ 30247.1-94 более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания не достигается (рис. 35).

Предельное состояние плиты перекрытия по потере теплоизолирующей способности (I) в результате превышения температуры в любой точке необогреваемой поверхности по ГОСТ 30247.1-94 более 220 °С не достигается (рис. 35).

Плита перекрытия снизу подшита негорючими листами ГКЛЮ, деревянные доски воздействию открытого пламени не подвергаются, а их температура в течение времени 45 минут не превышает температуру самовоспламенения древесины 390 °С (рис. 30), таким образом, горючие конструктивные элементы перекрытия не воспламеняются, и предельное состояние плиты перекрытия по потере целостности (E) не достигается.

Предельное состояние плиты перекрытия по потере несущей способности (R) вследствие обрушения или возникновения предельных деформаций не достигается, так как температура стали несущих конструктивных элементов плиты (сдвоенных швеллеров 18аУ) не достигает критической температуры 500 °С (рис. 31).

На основании вышеизложенного следует вывод, что за время 45 минут какое-либо предельное состояние исследуемой плиты перекрытия не достигается. Следовательно, **фактический предел огнестойкости перекрытия составляет не менее REI 45 и соответствует степени огнестойкости здания II.**

## **Список использованных источников**

1. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition.– 2015.
3. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. – 2015.
4. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности: монография / Пузач С.В. – М.: АГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
5. Справочник по свойствам веществ и материалов: плотность, теплопроводность, теплоемкость, вязкость и другие физические свойства веществ в таблицах в зависимости от температуры и давления. – <http://thermalinfo.ru/>
6. Сайт компании КНАУФ. – <https://www.knauf.ru/>
7. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.