

Определение предела огнестойкости стальной колонны с конструктивной огнезащитой по условиям фактической горючей нагрузки

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация .....	3
Топология модели объекта.....	4
Прочностной расчет .....	5
Теплотехнический расчет .....	10
Описание расчетной модели пожара.....	11
Горючая нагрузка .....	12
Величины и плоскости измерения.....	14
Результаты моделирования пожара.....	15
Результаты моделирования прогрева колонны .....	17
Определение фактического предела огнестойкости.....	22
Вывод.....	22
Список использованных источников .....	23

## Аннотация

В работе приведен прочностной расчет металлической колонны с конструктивной огнезащитой, описаны расчетная модель и результаты моделирования огневого воздействия на нее фактической горючей нагрузки, на основе результатов моделирования развития опасных факторов пожара в здании определен фактический предел огнестойкости колонны.

Цель расчета – определение фактического предела огнестойкости стальной колонны с конструктивной огнезащитой, выполненной листами ГКЛО, по условиям фактической горючей нагрузки в помещении операторской АЗС.

Объект – ....

Задачи:

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

## Топология модели объекта

Модель здания (рис. 1, рис. 2) выполнена в графическом интерфейсе Pygosim 2018 в соответствии с разделами АР, КМ1 проектной документации «...».

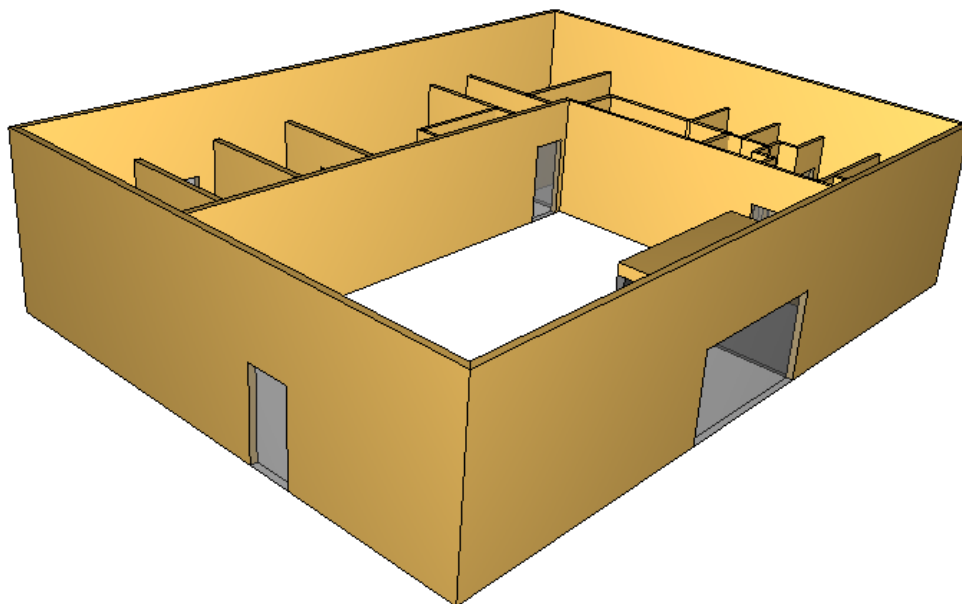


Рис. 1. Общий вид модели здания

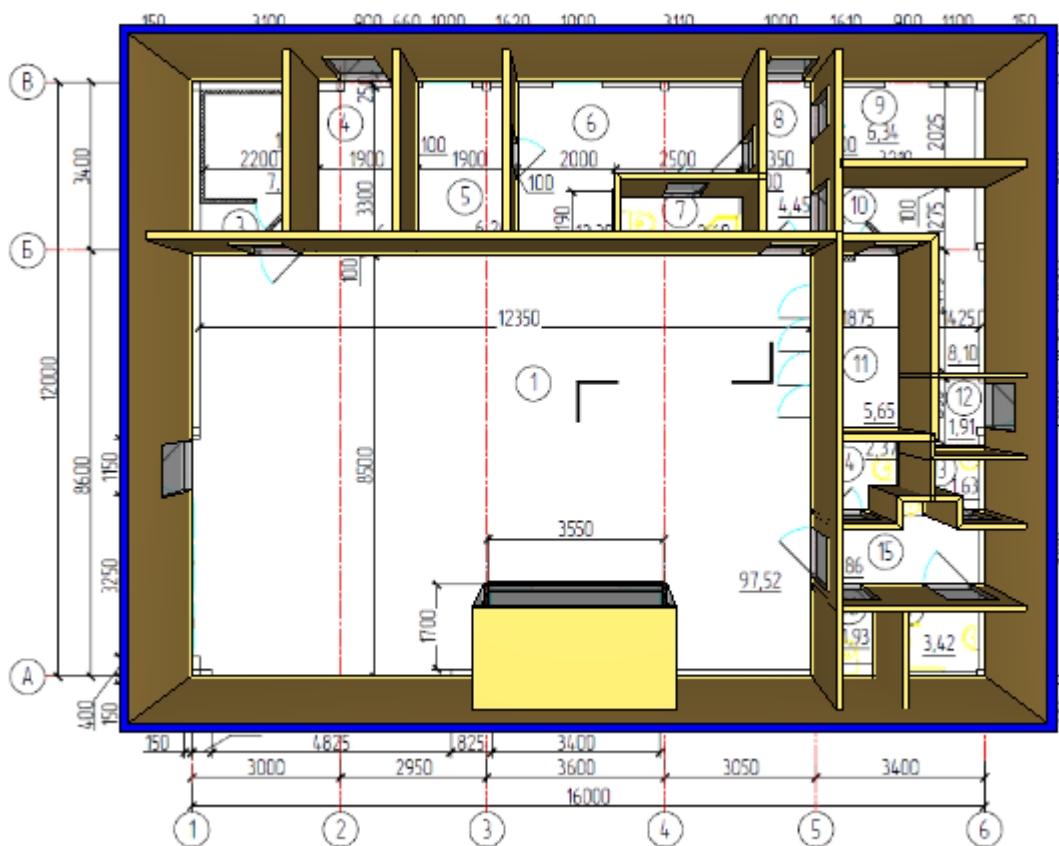


Рис. 2. Планировка помещений

## Прочностной расчет

Колонна К1 выполнена металлической конструкцией из стали С245, профиль конструкции – труба 150×150×7 (по ГОСТ 3245-2003).

Учитывая свойства металлических конструкций (распределение температуры по их сечению принимается равномерным), критическая температура в сечении, вызывающая потерю несущей способности, вычисляется в зависимости от коэффициентов  $\gamma_{tem}$  и  $\gamma_e$ , учитывающих изменения нормативного сопротивления и модуля упругости стали в зависимости от температуры (приведены в таблице 1):

- для изгибаемых и внецентренно-нагруженных конструкций;
- для центрально-нагруженных конструкций;
- для пространственных конструкций (ферм).

Таблица 1. Значение коэффициентов  $\gamma_{tem}$  и  $\gamma_e$ , учитывающих изменения нормативного сопротивления  $R_{yn}$  и модуля упругости  $E$  стали

Температура, С°	$\gamma_{tem}$	$\gamma_e$
20	1,0	1,0
100	0,99	0,96
150	0,93	0,95
200	0,85	0,94
250	0,81	0,92
300	0,77	0,90
350	0,74	0,88
400	0,70	0,86
450	0,65	0,84
500	0,58	0,80
550	0,45	0,77
600	0,34	0,72
650	0,22	0,68
700	0,11	0,59

При известных значениях коэффициента  $\gamma_{tem}$  можно определить значения критической температуры нагрева стали  $t_{cr}$  для предельного состояния конструкции, находящейся в условиях пожара, по формуле:

$$t_{cr} = \begin{cases} 750 - 440\gamma_{tem}, & \gamma_{tem} < 0,6 \\ 1330(1 - \gamma_{tem}), & \gamma_{tem} \geq 0,6 \end{cases}$$

Центрально-нагруженные элементы утрачивают несущую способность в результате потери прочности или за счет потери устойчивости.

Предел огнестойкости центрально-нагруженных элементов наступает в результате прогрева их сечения до критической температуры. Критическая температура таких стержней определяется как наименьшая величина из двух

найденных по таблице значений в зависимости от коэффициентов  $\gamma_{tem}$  и  $\gamma_e$ , определяемых по формулам:

$$\gamma_{tem} = \frac{N_n}{AR_{yn}},$$
$$\gamma_e = \frac{N_n}{\pi^2} \cdot \frac{l_0^2}{E_H J_{min}},$$

где:

$N_n$  – нормативная нагрузка, кН;

$A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$R_{yn}$  – начальное нормативное сопротивление стали, МПа;

$E_H$  – начальный модуль упругости стали,  $E_H = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;

$l_0$  – расчетная длина стержня, м;

$J_{min}$  – наименьший момент инерции сечения стержня, м<sup>4</sup>.

Центрально-сжатые и внецентренно-сжатые стальные элементы могут потерять несущую способность при нагреве в результате потери их устойчивости. Потеря устойчивости наступает за счет снижения модуля упругости, роста деформаций температурной ползучести металла и его температурного расширения.

Для таких стержней критическая температура  $t_{cr}$  определяется по критическим деформациям  $\varepsilon_{II}$  в зависимости от значения коэффициента  $\gamma_{tem}$ .

Значение  $\varepsilon_{II}$  для центрально-сжатых стержней определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{II} = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 - \frac{\sigma_n}{E},$$

где:

$\lambda$  – максимальная гибкость элемента:  $\lambda = \frac{l_0}{i_{min}}$ ,

$l_0$  – расчетная длина элемента:  $l_0 = \mu l$ ,

$\mu$  – коэффициент, учитывающий характер закрепления опор сжатого элемента (при шарнирном опирании сжатого элемента  $\mu = 1$ ; при жестком опирании  $\mu = 0,5$ ; при жестком опирании одной опоры и шарнирном опирании другой  $\mu = 0,7$ ; для консоли  $\mu = 2$ );

$l$  – геометрическая длина сжатого элемента.

$\sigma_n$  – напряжение в сечении от действия нормативной нагрузки:  $\sigma_n = N_n/A$ ,  
 $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости стали при температуре 20 °С.

Критическая температура  $t_{cr}$  для центрально-сжатых элементов из условия потери несущей способности в результате потери их устойчивости определяется с использованием кривых деформаций ползучести  $\varepsilon_{II}$  в зависимости от значения коэффициента  $\gamma_{tem}$ .

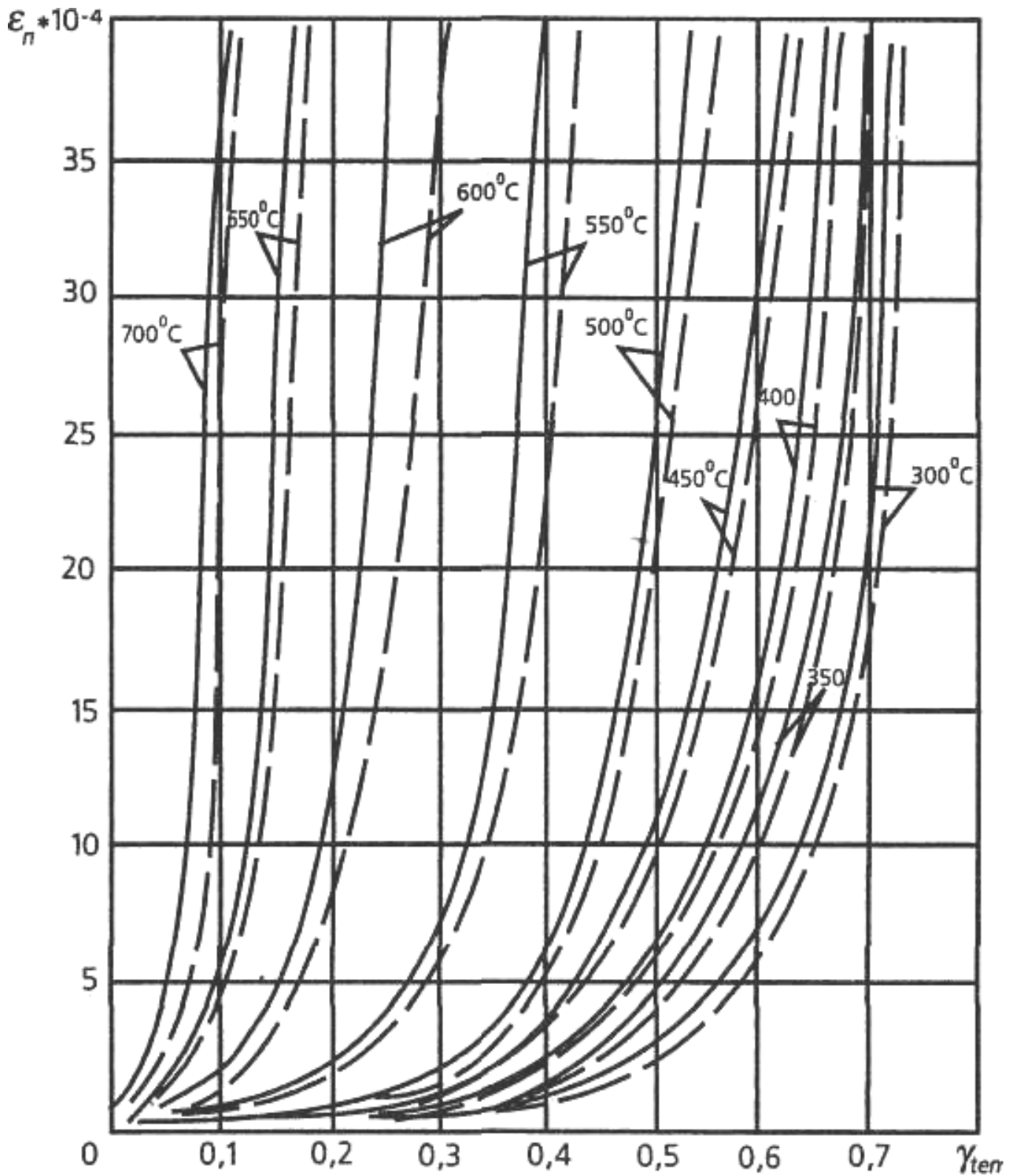


Рис. 3. Кривые деформации сталей при  $\epsilon_{II} < 0,004$  и степени нагружения  $\gamma_{tem}$ :  
 при  $R_{yn} < 290 \text{ МПа}$  — ; при  $R_{yn} \geq 290 \text{ МПа}$  - - - -

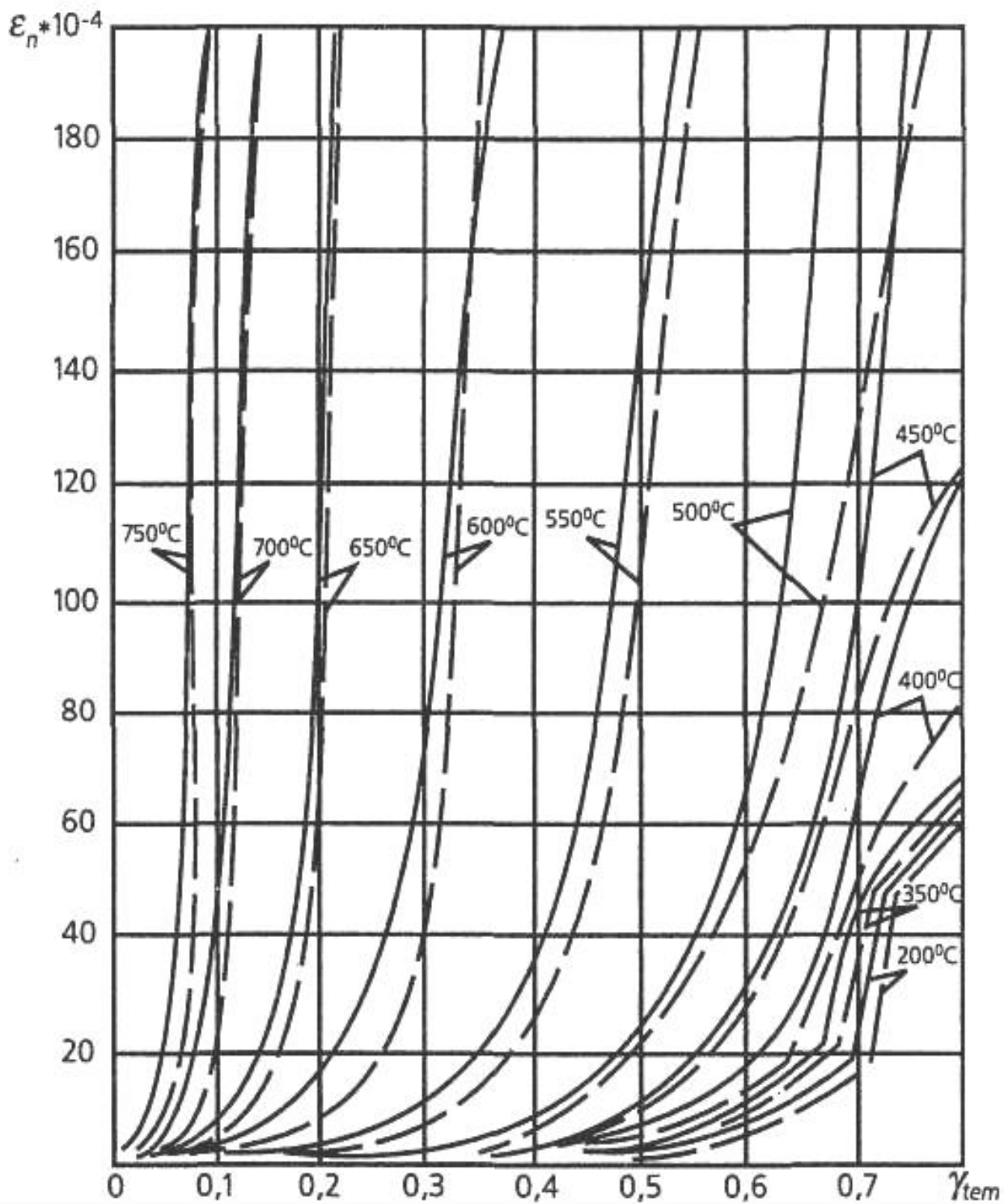


Рис. 4. Кривые деформации сталей при  $\epsilon_{II} < 0,02$  и степени нагружения  $\gamma_{tem}$ :  
 при  $R_{yn} < 290 \text{ МПа}$  — ; при  $R_{yn} \geq 290 \text{ МПа}$  - - - -



Определение критической температуры в сечении колонны K1.

Степень нагружения конструкции:

$$\gamma_{tem} = \frac{N_n}{AR_{yn}} = \frac{65,4 \cdot 10^3}{38,36 \cdot 10^{-4} \cdot 255 \cdot 10^6} = 0,07.$$

Критическая температура по потере прочности:

$$t_{cr'} = 750 - 440\gamma_{tem} = 750 - 440 \cdot 0,07 = 719,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Критическая деформация:

$$\varepsilon_{II} = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 - \frac{\sigma_n}{E} = \left(\frac{3,14}{69,3}\right)^2 - \frac{17 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5} = 19,7;$$

где:

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}} = \frac{\mu l}{i_{min}} = \frac{1 \cdot 4000}{57,7} = 69,3;$$

$$\sigma_n = \frac{N_n}{A} = \frac{65,4 \cdot 10^3}{38,36 \cdot 10^{-4}} = 17 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Критическая температура по потере устойчивости (рис. 3):

$$t_{cr''} = 715 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, критическая температура для наступления предела огнестойкости колонны составит:

$$t_{cr} = \min\{t_{cr'}; t_{cr''}\} = 715 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## Теплотехнический расчет

В теплотехнической части расчета производится моделирование прогрева металлических конструкций 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:

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

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

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

$\varepsilon_{пр}$  – 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:

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

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

Огнезащита металлической колонны выполнена листами ГКЛО (KNAUF-DF) в 2 слоя по 12,5 мм каждый, итого 25 мм.

Тепловые свойства стали, применяемые в расчете [5]:

- плотность 7850 кг/м<sup>3</sup>;
- теплопроводность 58 Вт/(м·К);
- теплоемкость 482 кДж/(кг·К).

Тепловые свойства гипсокартонного листа, применяемые в расчете [5, 6]:

- плотность 816 кг/м<sup>3</sup>;
- теплопроводность 0,2 Вт/(м·К);
- теплоемкость 860 кДж/(кг·К).

Описанная модель теплообмена и характеристики материалов реализованы в программном комплексе ANSYS Mechanical 19.0 Academic (рис. 5).

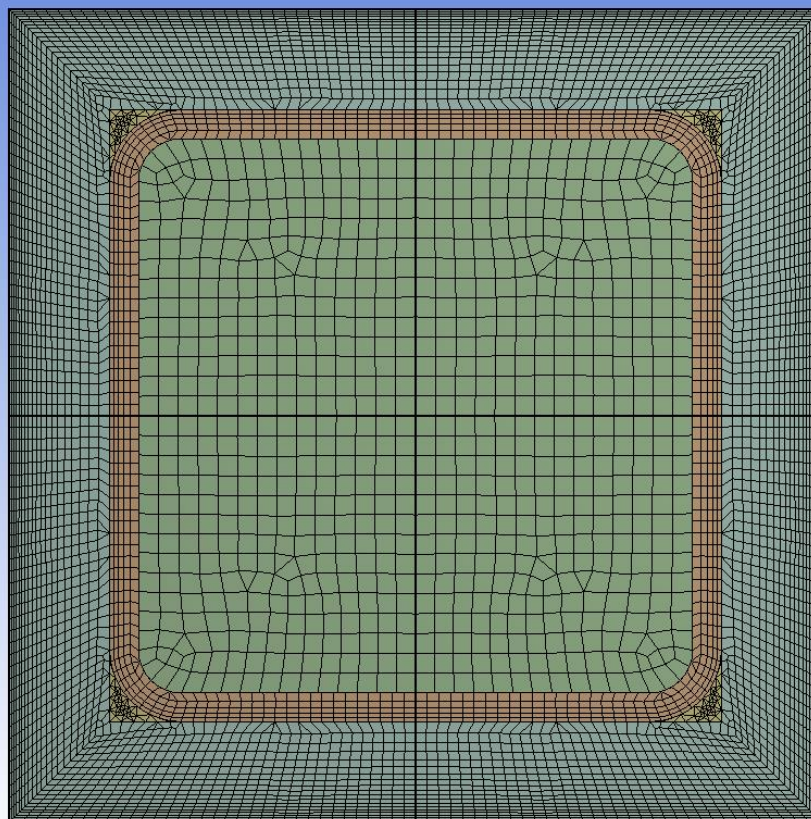


Рис. 5. Расчетная сетка модели колонны К1 в сечении

### *Описание расчетной модели пожара*

Моделирование пожара в помещении операторской 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***

Очагом пожара принят торговый зал, как помещение с наибольшей площадью и, соответственно, наибольшей максимальной мощностью тепловыделения при пожаре (рис. 6).

Характеристики горючей нагрузки для торгового зала приняты типовые по [4] «Магазины»:

- низшая теплота сгорания: 15800 кДж/кг;
- удельная скорость выгорания: 0,015 кг/м<sup>2</sup>·с;
- удельное дымовыделение: 270 Нп·м<sup>2</sup>/кг;
- удельное выделение углекислого газа: 0,85 кг/кг;
- удельное выделение угарного газа: 0,043 кг/кг;
- удельное выделение хлороводорода: 0,023 кг/кг;
- удельное потребление кислорода: 1,25 кг/кг;
- линейная скорость распространения пламени: 0.0055 м/с.

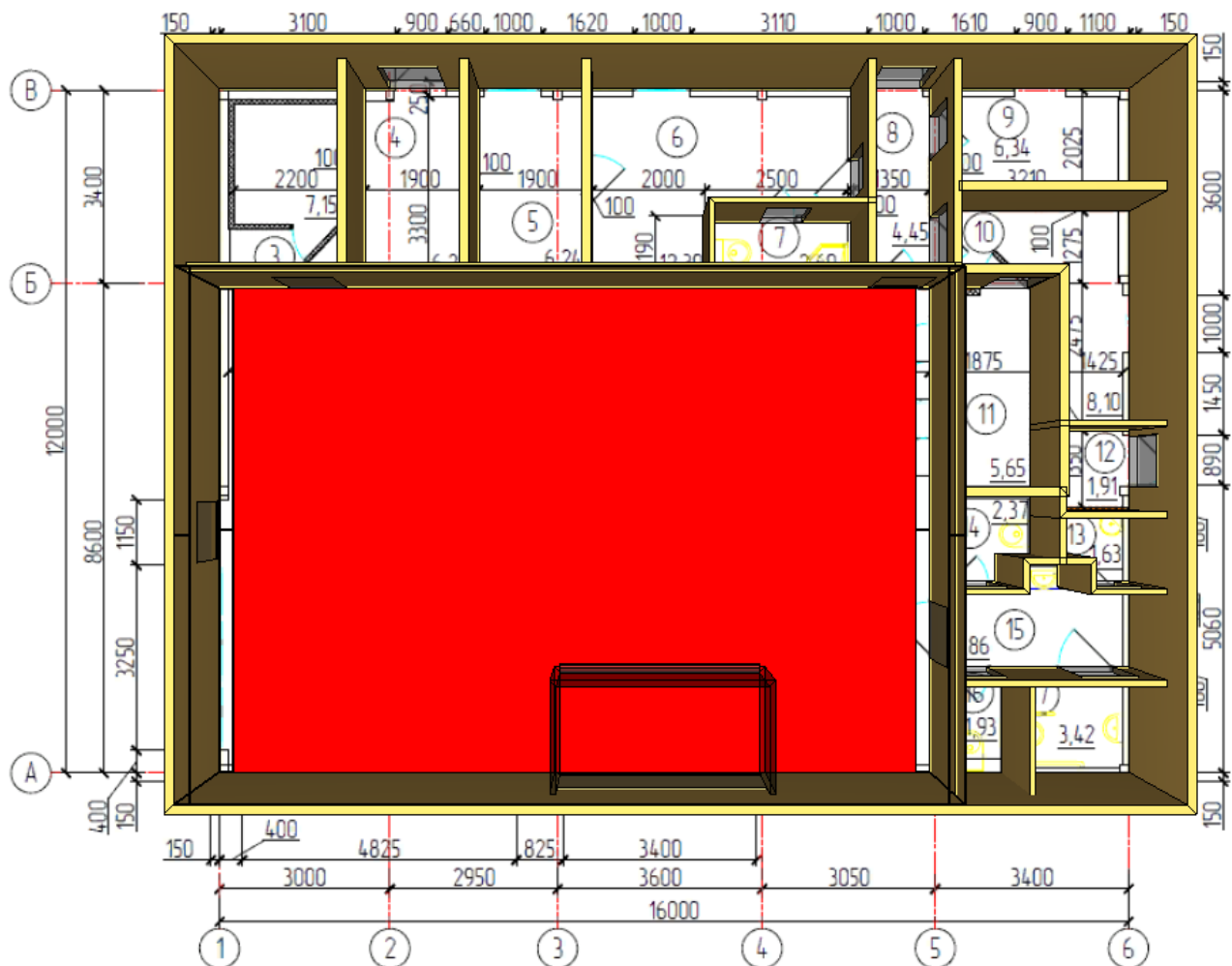


Рис. 6. Расположение очага пожара

Записи FDS:

```

&SPEC ID = 'MY_FUEL', MW = 87.17236/
&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)= 0.2251,
SPEC_ID(2)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(2)= 1.6826,
SPEC_ID(3)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)= 0.1337,
SPEC_ID(4)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(4)=0.0550,
SPEC_ID(5)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(5)= 6.3009,
SPEC_ID(6)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(6)= 12.8025/

&REAC ID='Магазины', FYI='Пособие к методике приказа №382', FUEL='MY_FUEL',
HEAT_OF_COMBUSTION=15800, PEC_ID_NU='MY_FUEL', 'MY_AIR', 'MY_PRODUCTS',
NU=-1, -3.4032,1, REAC_MASS_ERROR=1/

&SURF ID='Магазины', FYI='Пособие к методике приказа №382', COLOR='RED',
HRRPUA=237.0, TAU_Q=-1057.0/

&VENT ID='ГН', SURF_ID='Магазины', XB=0.25,12.25,0.0,8.5,0.0,0.0/

```

### ***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 (рис. 7), а также среднеобъемная температура воздуха в непосредственной близости к месту возникновения пожара (расположение конвективной колонки) – как место с максимально возможной динамикой нарастания температуры в начальной стадии пожара (рис. 8).

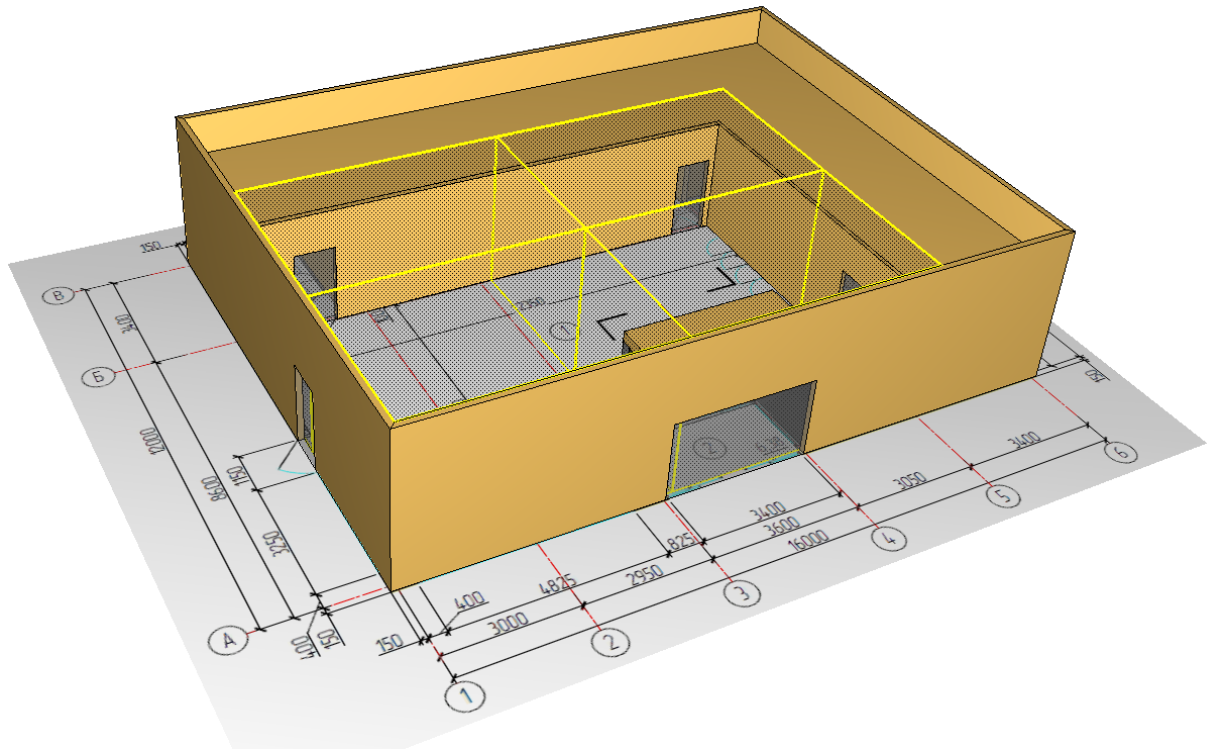


Рис. 7. Границы замера среднеобъемной температуры в помещении,  $T_{cp}$ .

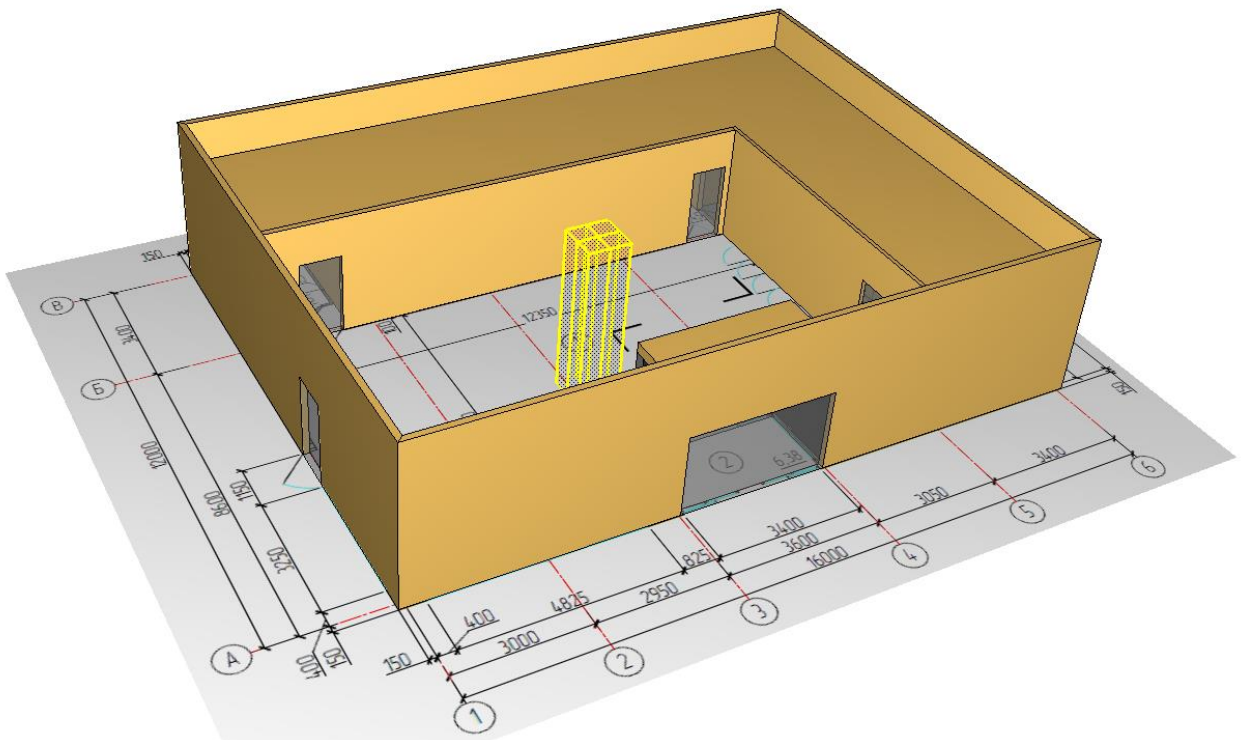


Рис. 8. Границы замера среднеобъемной температуры вблизи места возникновения пожара (конвективная колонка),  $T_k$ .



### *Результаты моделирования пожара*

Динамика опасных факторов пожара и графики изменения среднеобъемной температуры представлены на рис. 9 – рис. 14.

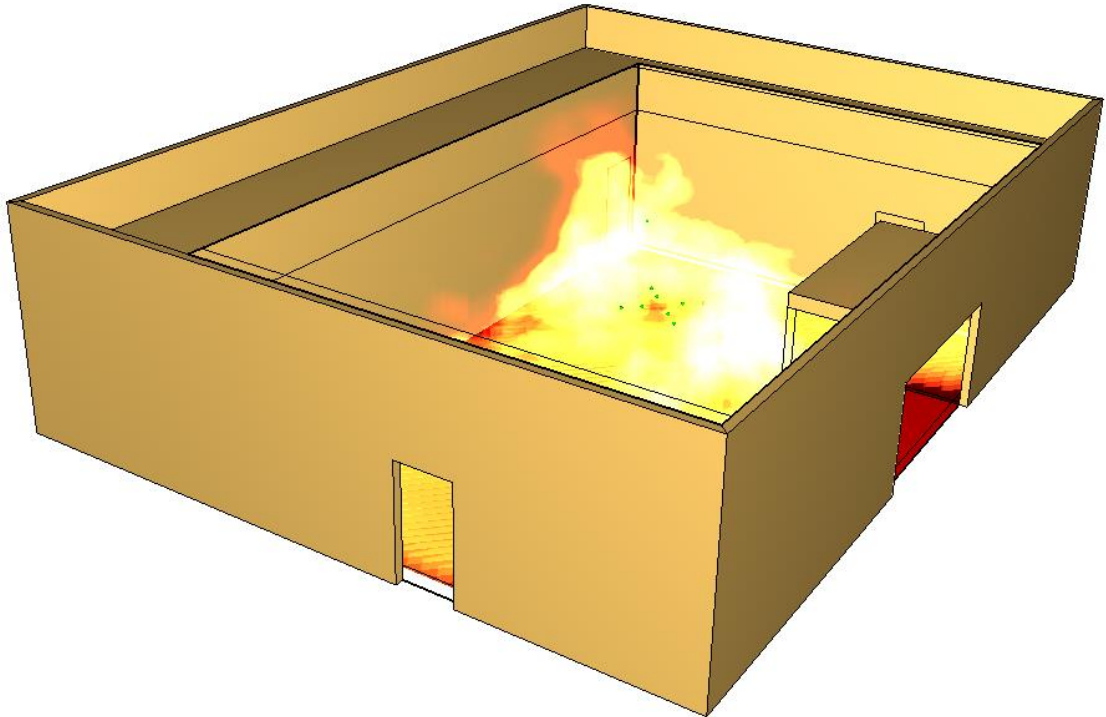


Рис. 9. Мощность тепловыделения более  $80 \text{ кВт/м}^3$  в развитой стадии пожара

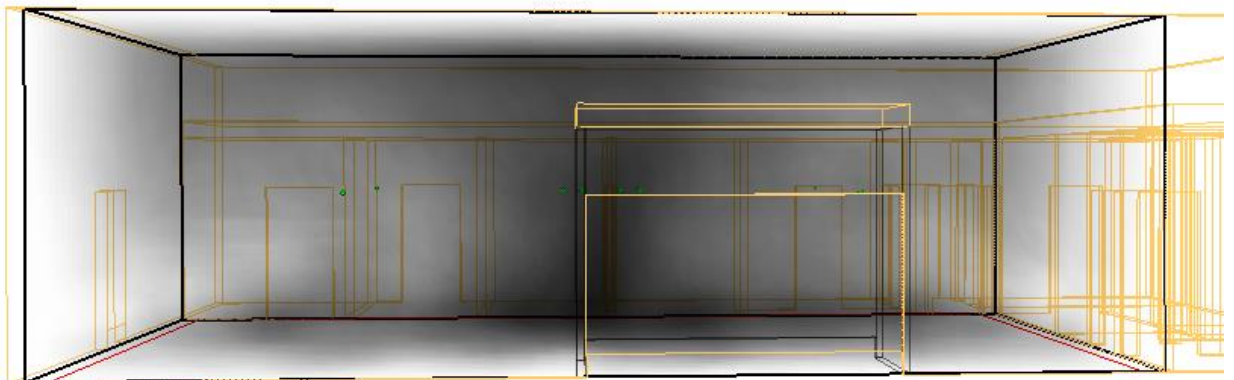


Рис. 10. Оптическая плотность дыма в начальной стадии пожара

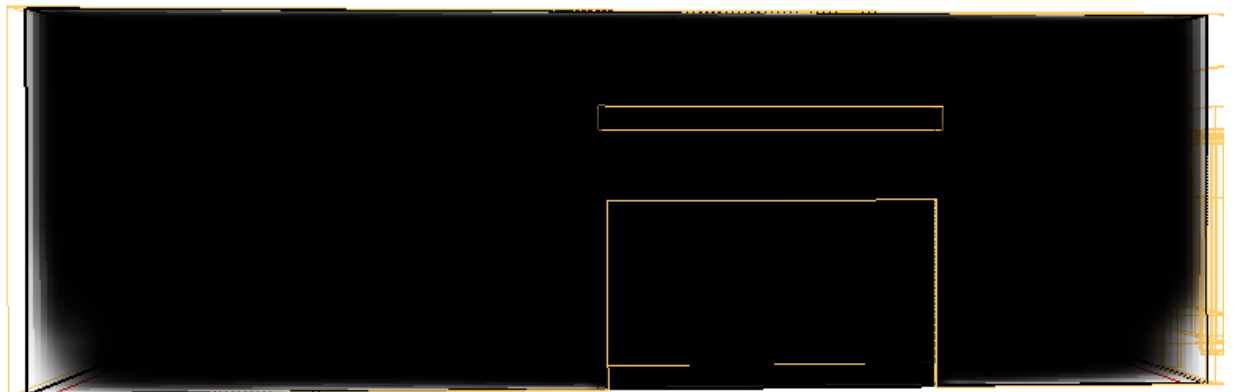


Рис. 11. Оптическая плотность дыма в развитой стадии пожара

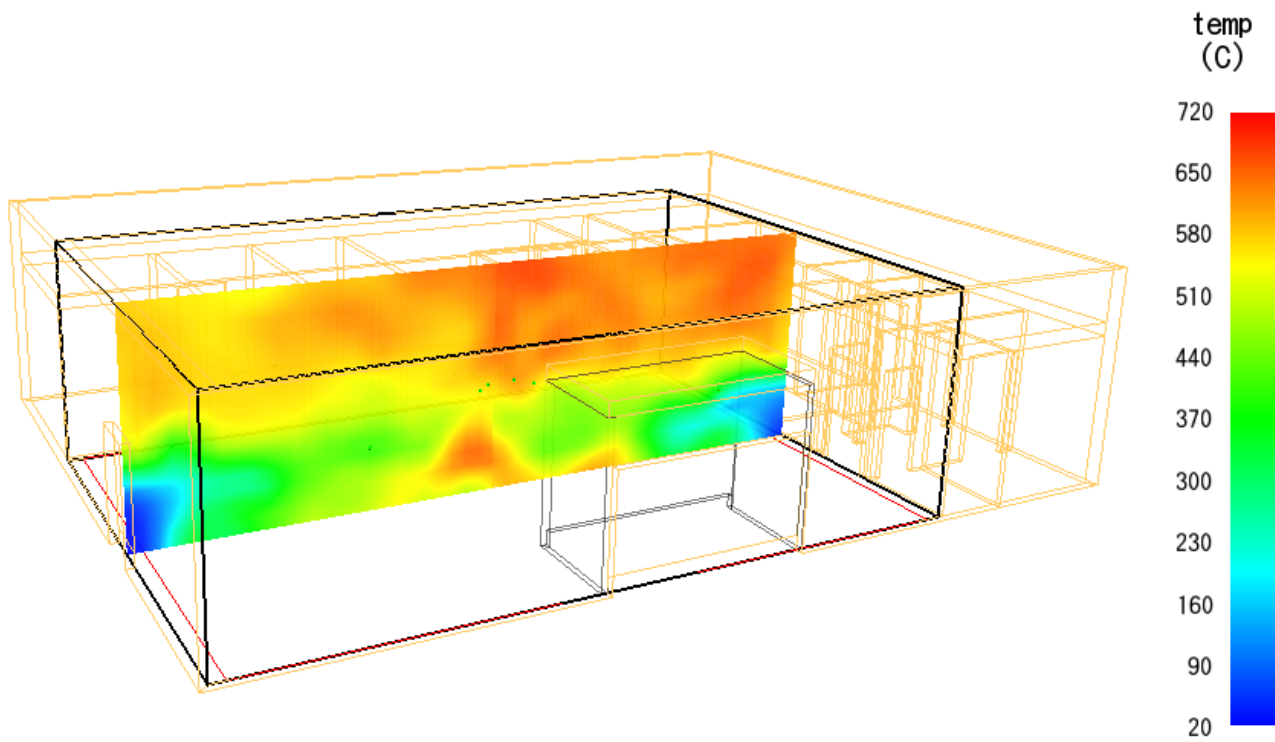


Рис. 12. Температура газовой среды в продольном сечении помещения торгового зала в развитой стадии пожара

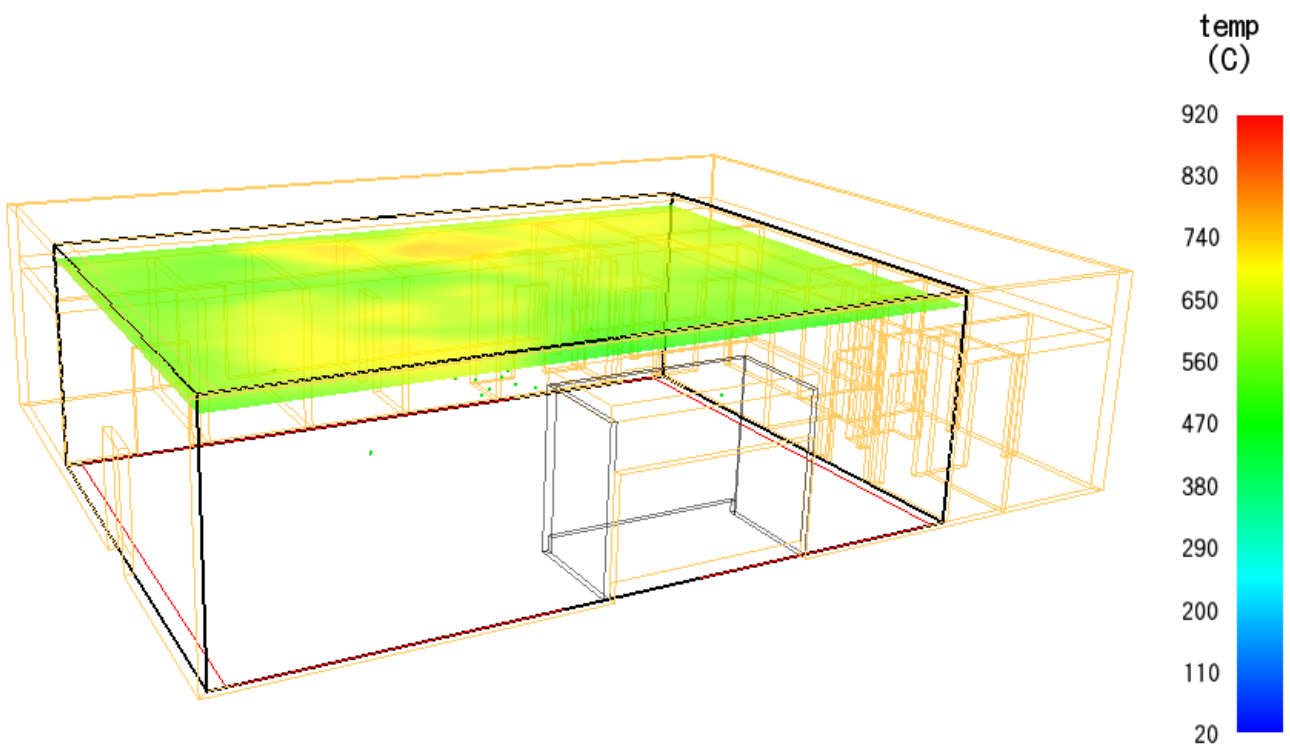


Рис. 13. Температура газовой среды в припотолочном слое в развитой стадии пожара



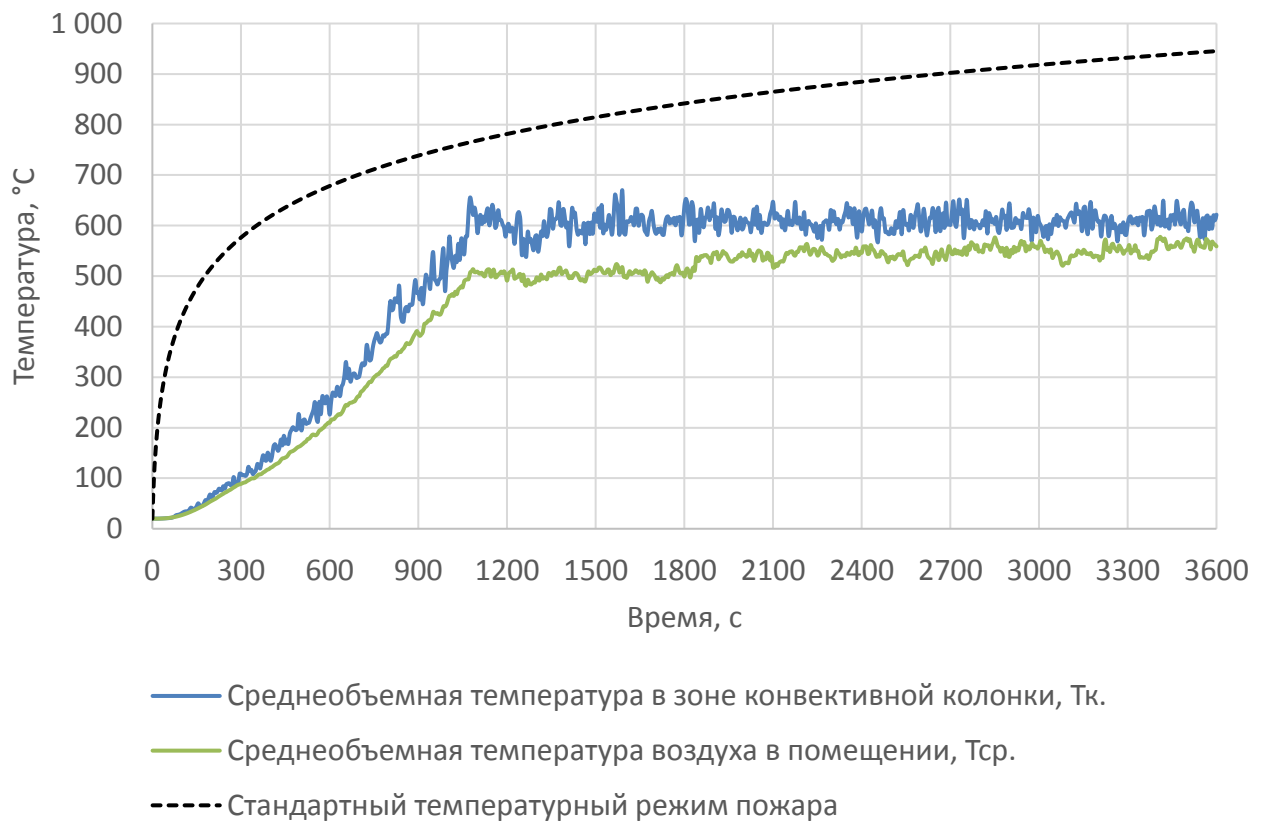


Рис. 14. Динамика температуры газовой среды в помещении по результатам моделирования с учетом фактической горючей нагрузки

Согласно результатам моделирования, среднеобъемная температура газовой среды в помещении операторской в целом ниже температуры стандартного режима пожара.

Для моделирования прогрева металлической колонны с конструктивной огнезащитой температуру воздуха с определенным запасом надежности принимаем по графику  $T_k$  – среднеобъемная температура в зоне конвективной колонки в центре помещения, которая в целом выше температуры, усредненной по объему всего помещения.

### ***Результаты моделирования прогрева колонны***

Графики и поля температуры в сечении рассматриваемой колонны по результатам моделирования конвективного теплообмена и теплообмена излучением приведены на рис. 15 – рис. 19 и таблице 2.

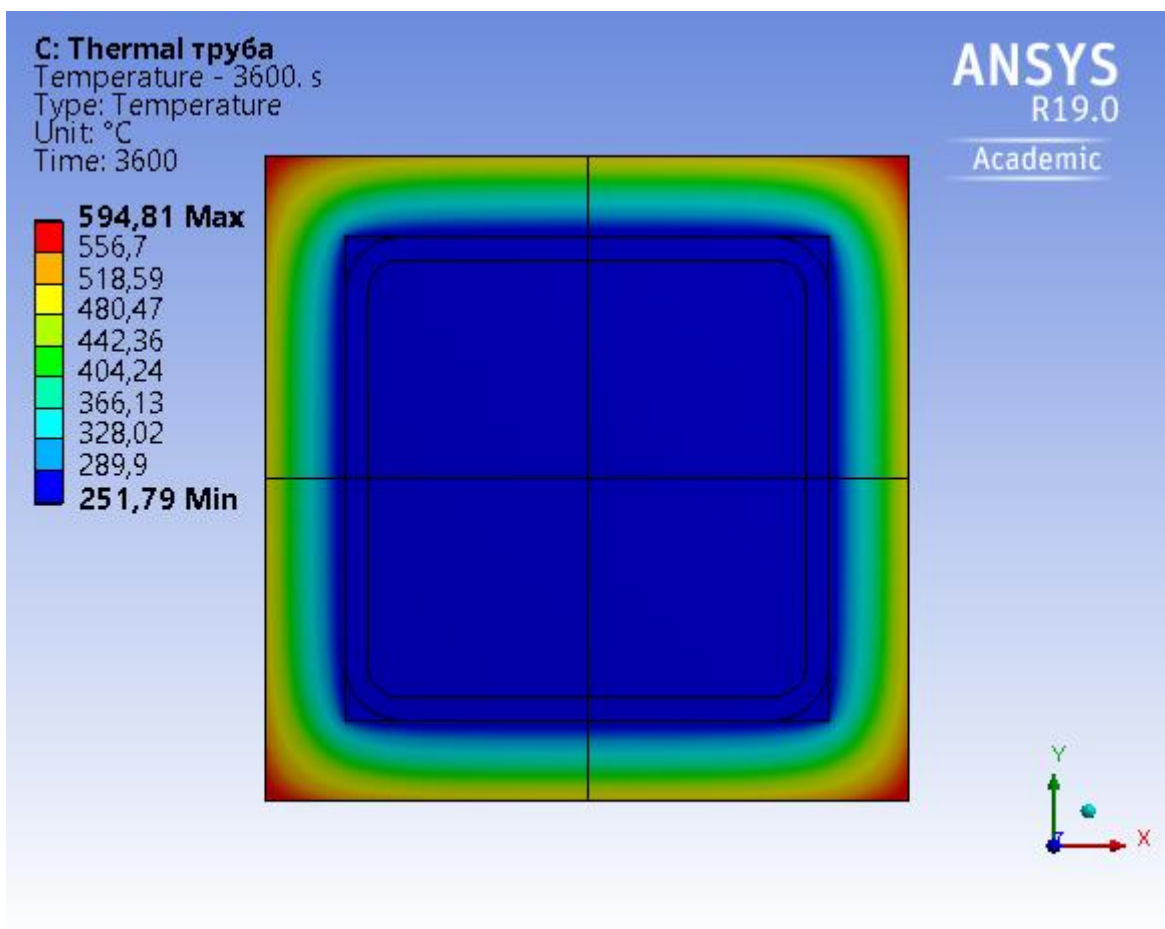


Рис. 15. Температура в сечении колонны на момент времени 3600 с

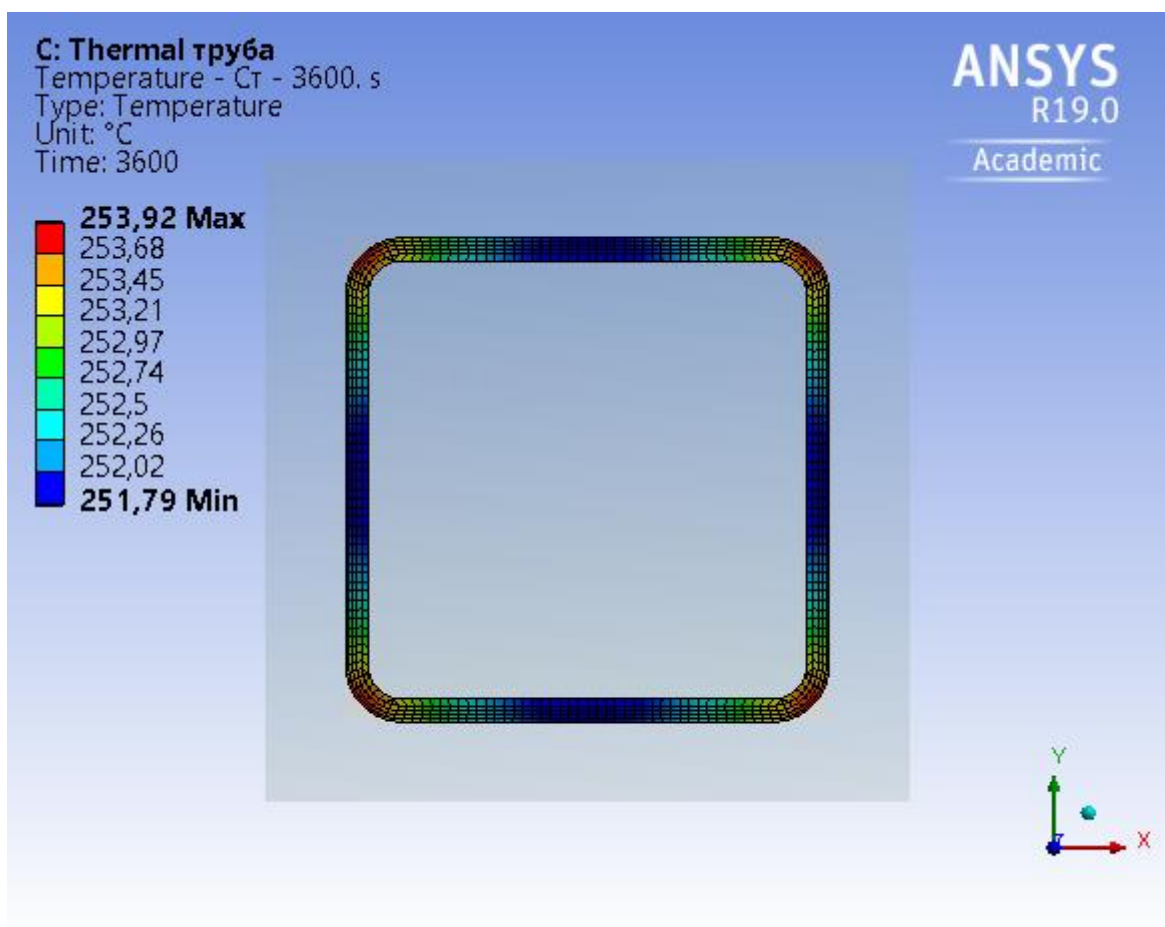


Рис. 16. Температура в сечении трубы на момент времени 3600 с

C: Thermal труба  
Temperature 2  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 3600

ANSYS  
R19.0  
Academic

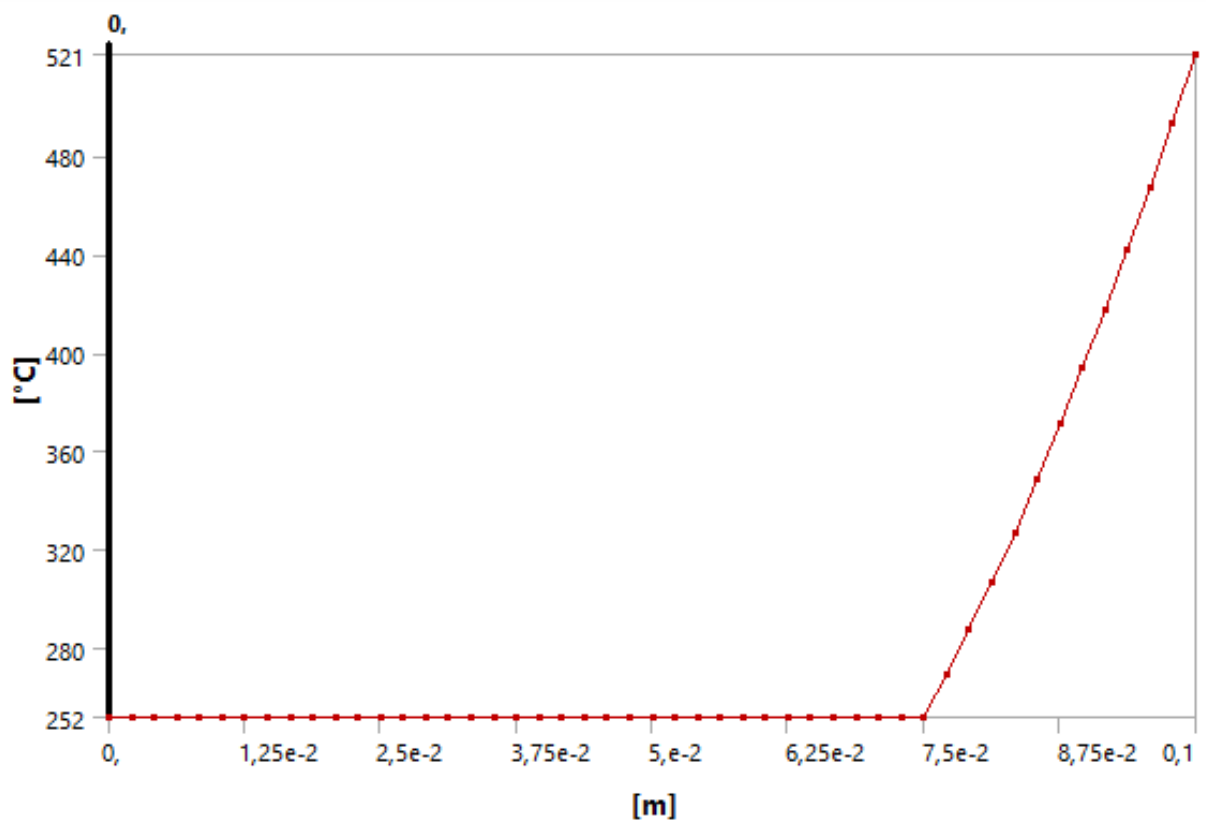
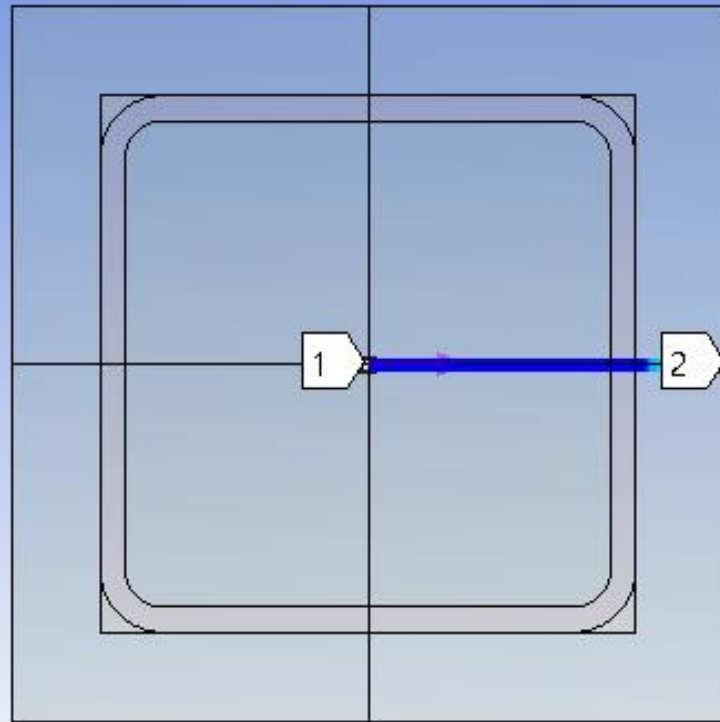


Рис. 17. Температура в сечении колонны на отрезке (0;0)-(100;0) на момент времени 3600 с

C: Thermal труба  
Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 3600

ANSYS  
R19.0  
Academic

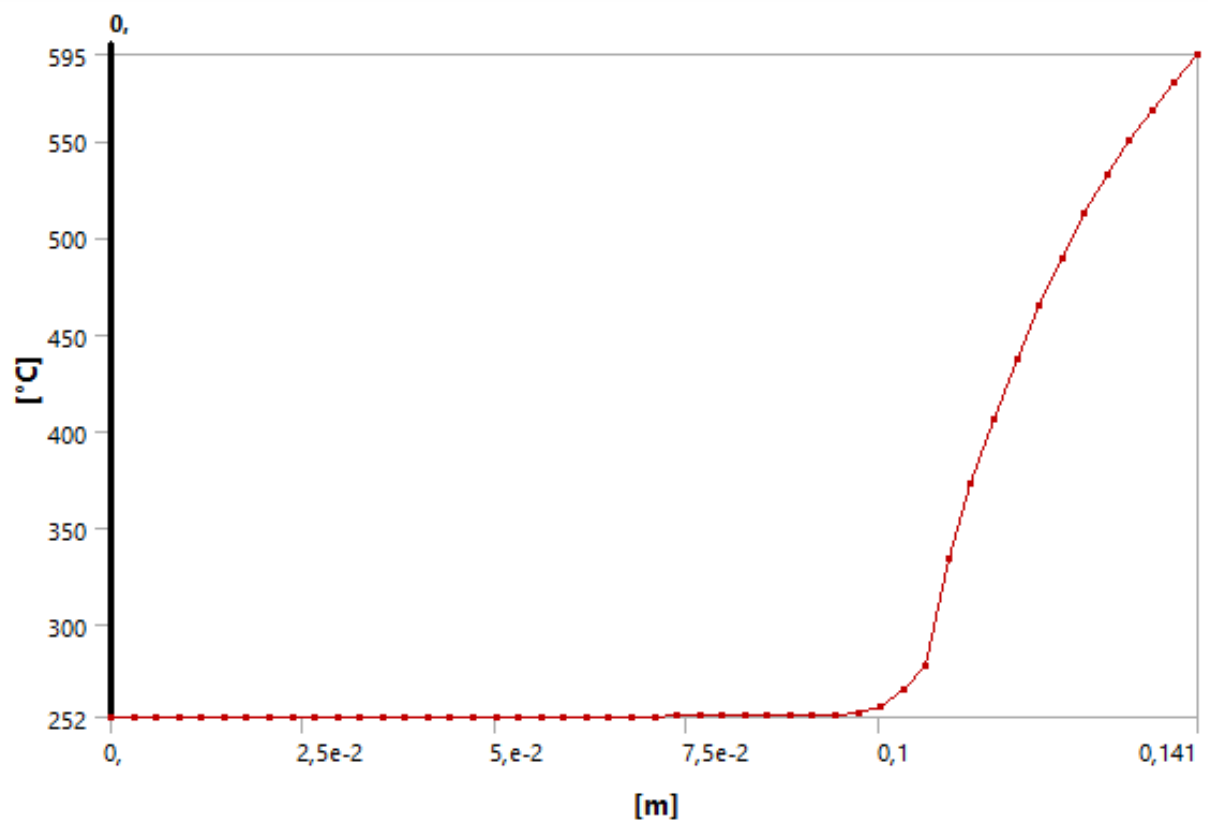
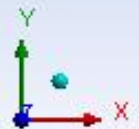
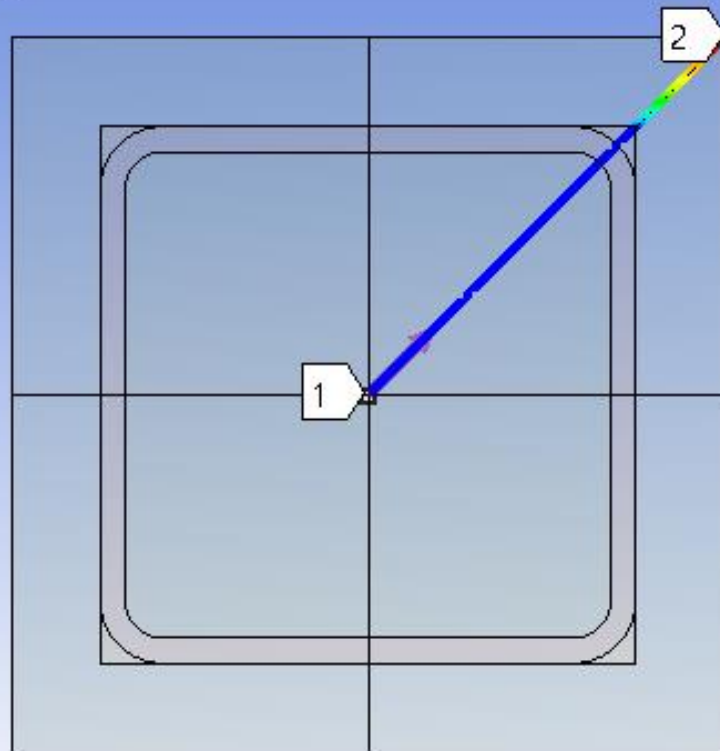


Рис. 18. Температура в сечении колонны на отрезке (0;0)-(100;100) на момент времени 3600 с

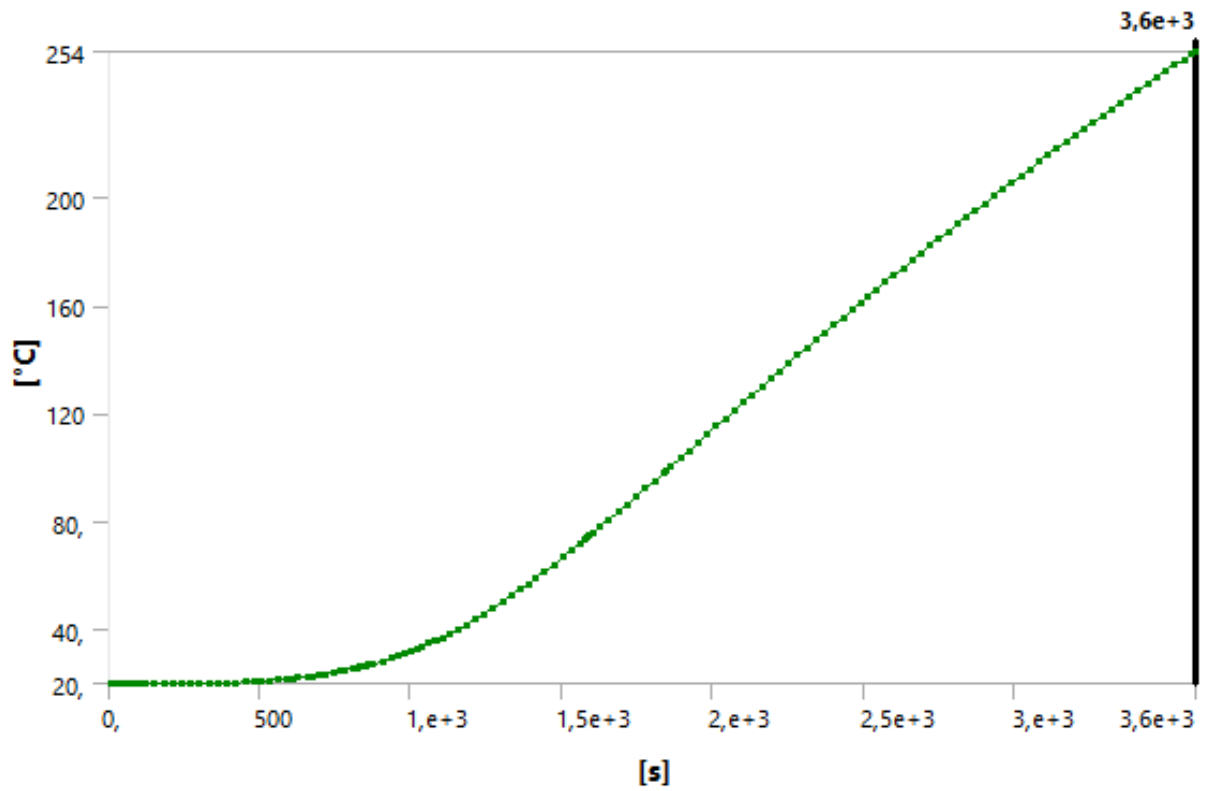


Рис. 19. Максимальная температура в сечении трубы

Таблица 2. Максимальная температура в сечении трубы

$\tau$ , с	$T$ , °C	$\tau$ , с	$T$ , °C	$\tau$ , с	$T$ , °C	$\tau$ , с	$T$ , °C
0	20,0	451	20,5	977	31,0	1580	73,4
5	20,0	481	20,7	1000	31,9	1590	74,0
7	20,0	506	20,8	1020	32,8	1590	74,5
8	20,0	531	21,0	1040	33,7	1610	75,8
9	20,0	561	21,3	1060	34,8	1630	77,8
11	20,0	591	21,6	1080	35,5	1660	80,6
15	20,0	610	21,8	1080	35,9	1690	83,5
23	20,0	628	22,0	1090	36,2	1720	86,3
39	20,0	658	22,5	1110	37,1	1750	89,2
49	20,0	678	22,7	1130	38,3	1780	92,1
59	20,0	697	23,1	1150	39,8	1810	95,0
74	20,0	717	23,4	1180	41,6	1840	97,8
86	20,0	747	24,0	1210	43,6	1850	99,1
98	20,0	765	24,4	1240	45,6	1860	100,0
122	20,0	783	24,8	1270	47,7	1890	103,0
152	20,0	809	25,4	1300	50,0	1920	106,0
182	20,0	822	25,8	1330	52,3	1950	109,0
212	20,0	834	26,1	1360	54,7	1980	112,0
242	20,0	846	26,4	1390	56,7	2010	115,0
272	20,0	854	26,6	1410	58,9	2040	118,0
302	20,1	862	26,9	1440	61,4	2070	121,0
332	20,1	876	27,3	1470	64,0	2100	124,0
362	20,2	906	28,3	1500	66,6	2130	127,0
392	20,3	936	29,4	1530	69,3	2160	130,0
421	20,4	957	30,1	1560	72,0	2190	133,0

τ, с	T, °C	τ, с	T, °C	τ, с	T, °C	τ, с	T, °C
2220	136,0	2570	168,0	2930	200,0	3290	230,0
2250	138,0	2600	171,0	2960	203,0	3320	233,0
2280	141,0	2630	174,0	2990	205,0	3350	235,0
2310	144,0	2660	177,0	3020	208,0	3380	237,0
2340	147,0	2690	179,0	3050	211,0	3410	240,0
2370	150,0	2720	182,0	3080	213,0	3440	242,0
2400	153,0	2750	185,0	3110	216,0	3470	244,0
2430	156,0	2780	187,0	3140	218,0	3500	247,0
2460	158,0	2810	190,0	3170	220,0	3530	249,0
2490	161,0	2840	193,0	3200	223,0	3560	251,0
2520	163,0	2870	195,0	3230	225,0	3590	253,0
2540	166,0	2900	198,0	3260	228,0	3600	254,0

### **Определение фактического предела огнестойкости**

По результатам прочностных расчетов критическая температура металлической колонны, при которой наступает предел огнестойкости по несущей способности (по потере устойчивости), составляет 715 °С.

В результате теплотехнических расчетов получено, что при расположении колонны в непосредственной близости от возможного очага пожара максимальная температура их нагрева в результате конвективного теплообмена и теплообмена излучением не превышает 254 °С в течение одного часа.

На основании вышеизложенного следует вывод, что фактический предел огнестойкости металлической колонны при огневом воздействии фактической горючей нагрузки составляет не менее 60 минут.

### **Вывод**

Фактический предел огнестойкости металлической колонны (труба 150×150×7) с конструктивной огнезащитой листами ГКЛО (Knauf-DF) толщиной 25 мм при огневом воздействии фактической горючей нагрузки составляет не менее 60 минут.

## 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. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». – 2-е изд., испр. и доп.– М.: ВНИИПО, 2014. – 226 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/>