

### Приложение 3

# Компьютерное моделирование развития пожара

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| 1. Аннотация.....                                  | 3  |
| 2. Цели и задачи .....                             | 3  |
| 3. Расчетная модель .....                          | 3  |
| 4. Описание сценария пожара .....                  | 5  |
| 5. Модель объекта .....                            | 7  |
| 5.1. Топология здания .....                        | 7  |
| 5.2. Вентиляция .....                              | 8  |
| 5.3. Расчетные точки .....                         | 8  |
| 6. Аппаратное обеспечение .....                    | 10 |
| 7. Результаты моделирования .....                  | 11 |
| 7.1. ОФП в расчетных точках .....                  | 11 |
| 7.2. Поля ОФП на момент 10 минут по оси Б .....    | 14 |
| 7.3. Поля ОФП на момент 10 минут по осям 6-7 ..... | 17 |
| 7.4. Время блокирования .....                      | 20 |
| 8. Список литературы .....                         | 20 |

## 1. Аннотация

В работе описаны расчетная модель и результаты моделирования развития пожара в здании торгового центра с помощью полевой модели пожара FDS для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

## 2. Цели и задачи

Цель расчета – получение данных об изменении опасных факторов пожара и определение времени блокирования ими путей эвакуации из здания при наиболее потенциально опасных сценариях возникновения и развития пожара.

Задачи:

- описание расчетной модели;
- построение топологии здания, формулирование пожароопасных свойств горючей нагрузки;
- моделирование развития пожара и получение расчетных данных.

## 3. Расчетная модель

Моделирование выполнено в программе FDS с использованием графического интерфейса PyroSim.

FDS (Fire Dynamic Simulation) реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. FDS численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. Модель 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 лагранжевые частицы.

На сегодняшний день приблизительно половина приложений модели служит для проектирования систем управления дымом и изучения активации спринклеров и детекторов. Другая часть служит для восстановления картины пожара в жилых и промышленных помещениях. Основной целью FDS на протяжении своего развития было решение прикладных задач пожаробезопасности и, в тоже время, обеспечение инструментом 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.

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b'''$$

Закон сохранения момента импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

где тензор вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2 S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) ; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} ; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i,j = 1,2,3$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' + \epsilon$$

где теплоперенос

$$\dot{\mathbf{q}}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{\mathbf{q}}_r''$$

а энергия рассеяния

$$\epsilon \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mu \left( 2 S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right)$$

Уравнение состояния газа:

$$p = \frac{\rho \mathcal{R} T}{W}$$

Эти шесть уравнений имеют шесть независимых переменных: три компоненты скорости, плотность, температура и давление.

Закон сохранения отдельных компонент:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\alpha}) + \nabla \cdot \rho Y_{\alpha} \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{m}_{\alpha}'''$$

Для моделирования турбулентности FDS использует метод LES (Large Eddy Simulation) – масштабное моделирование вихрей. LES используется для моделирования диссипативных процессов (вязкость, теплопроводность,

диффузивность), масштабы которых меньше размеров явно определенной численной сетки. Это значит, что параметры  $\mu$ ,  $k$ ,  $D$  в вышеприведенных уравнениях не могут использоваться впрямую и заменяются выражениями, моделирующими их действие

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2 \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr_t} ; \quad (\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}$$

При использовании LES в качестве модели сгорания обычно используется модель доли в смеси (mixture fraction). «Доля в смеси» в данном смысле – 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, соответственно отсюда и название «метод конечных объемов» (FVM). При использовании приблизительно 100 дискретных углов вычисления лучистого теплообмена занимает примерно 20 % общего времени загрузки центрального процессора, небольшой расход задан уровнем сложности лучистого теплообмена. Коэффициенты поглощения сажей и дымом вычислены с помощью узкополосной модели RADCAL. Капли жидкости могут поглощать и рассеивать тепловое излучение. Это крайне важно при использовании распыляющих спринклеров, но имеет значение и для других спринклеров.

Подробнее с математической моделью FDS можно ознакомиться в техническом руководстве [1].

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» [2].

#### 4. Описание сценария пожара

Для целей настоящего расчета в качестве наиболее неблагоприятного рассматривается пожар на уровне +0.0 м торгового центра, в одном из магазинов. Магазин расположен вблизи главного выхода из здания, что может

привести к блокированию главного выхода, а также вблизи проема, через который продукты горения будут поступать на верхние уровни, что создаст наиболее быстрое их распространение на верхние уровни. Воздействие опасных факторов пожара при возможном скоплении большого количества людей у главного выхода и при выходе их со второго этажа может привести к гибели людей.

Пожар возникает в магазине (поз. №190). Первичным источником зажигания служит малокалорийный источник тепла. Пламя распространяется по горючей нагрузке радиально (форма развития пожара круговая).

Характеристики горючей нагрузки принятые типовые по [3] «Магазины»:  
линейная скорость распространения пламени: 0,0055 м/с;  
удельная скорость выгорания: 0,015 кг/м<sup>2</sup>·с;  
низшая теплота сгорания: 15800 кДж/кг;  
удельное дымоудаление: 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 HCl: 0,023 кг/кг;  
удельное потребление кислорода: 1,25 кг/кг.

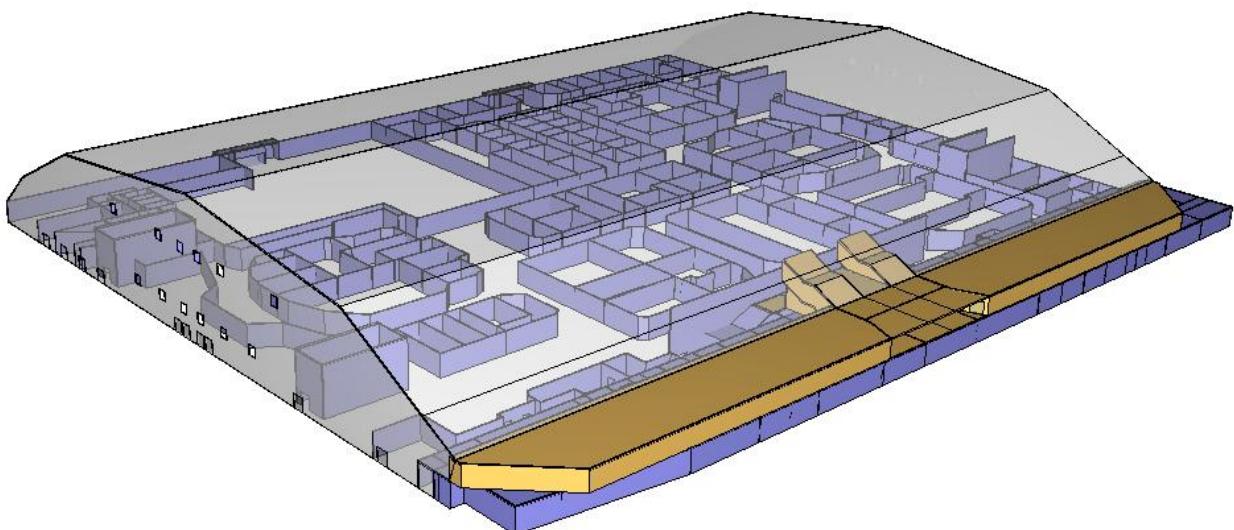
Бутик в торговом зале выделен перегородкой, потолок открытый. Продукты горения выходят из магазина вертикально вверх, а также через дверь в перегородке высотой 2 м, шириной 1,5 м.

Моделирование выполняется с учетом работы системы дымоудаления. В соответствии с проектом дымоудаление осуществляется через верхние ряды фрамуг окон, имеющие автоматическое управление (механизированный привод) для открывания. Расположенный в центре торгового зала проем площадью 1600 м<sup>2</sup> и проемы по периметру 1 этажа позволяют рассматривать 1 и 2 этажи как единое воздушное пространство, аentralный проем будет выполнять роль дымовой шахты. На фасадах здания со стороны ул. Белинского и ул. 8 Марта установлены по 12 окон размером 1,5x1,5 м (6 окон на высоте 3,5 м и 6 окон на высоте 12,5 м).

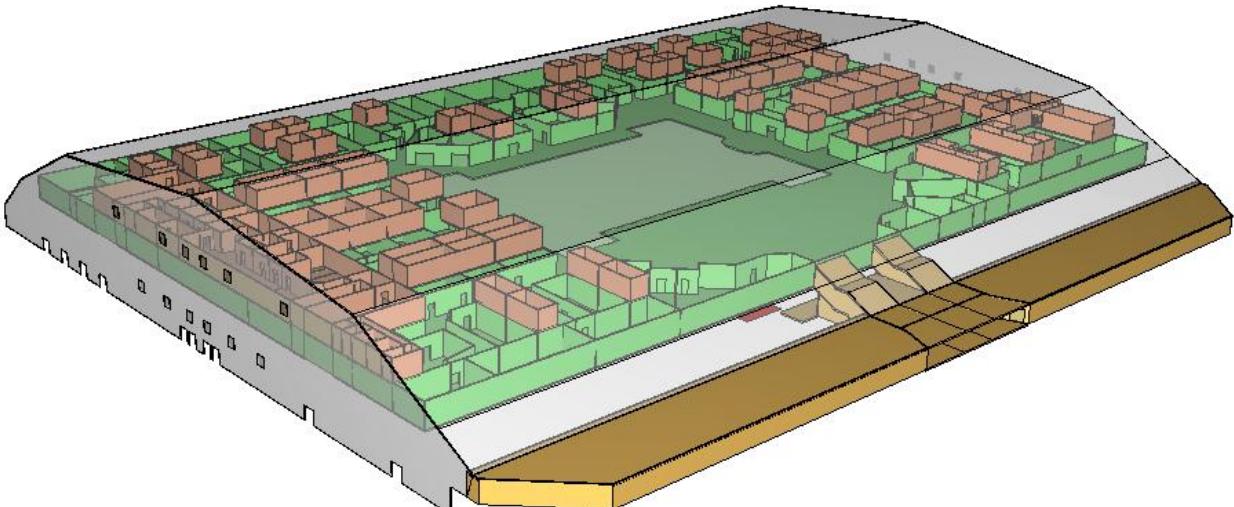
## 5. Модель объекта

Модель здания для использования в программе FDS выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2015.

### 5.1. Топология здания



Модель первого этажа



Модель второго этажа с антресолью



Общий вид модели здания

## 5.2. Вентиляция

Дымоудаление осуществляется через верхние ряды фрамуг окон, имеющие автоматическое управление (механизированный привод) для открывания. Расположенный в центре торгового зала проем площадью 1600 м<sup>2</sup> и проемы по периметру 1 этажа позволяют рассматривать 1 и 2 этажи как единое воздушное пространство, а центральный проем будет выполнять роль дымовой шахты. На фасадах здания со стороны ул. ... и ул. ... установлены по 12 окон размером 1,5x1,5 м (6 окон на высоте 3,5 м и 6 окон на высоте 12,5 м).

## 5.3. Расчетные точки

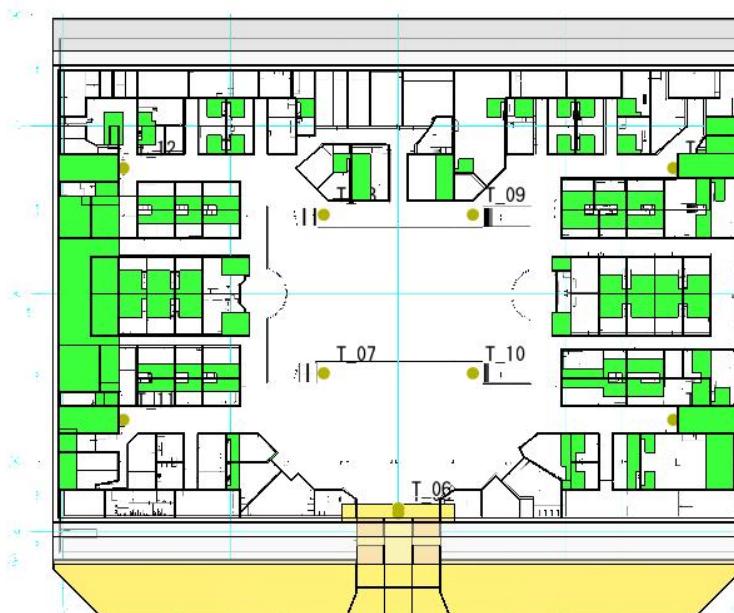
Для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара используются соответствующие датчики (расчетные точки), установленные в следующих местах:

- Точка\_01 – у выходов наружу №№ 13, 14;
- Точка\_02 – у выхода наружу № 1;
- Точка\_03 – у выхода наружу № 2;
- Точка\_04 – у выходов наружу №№ 7, 8;

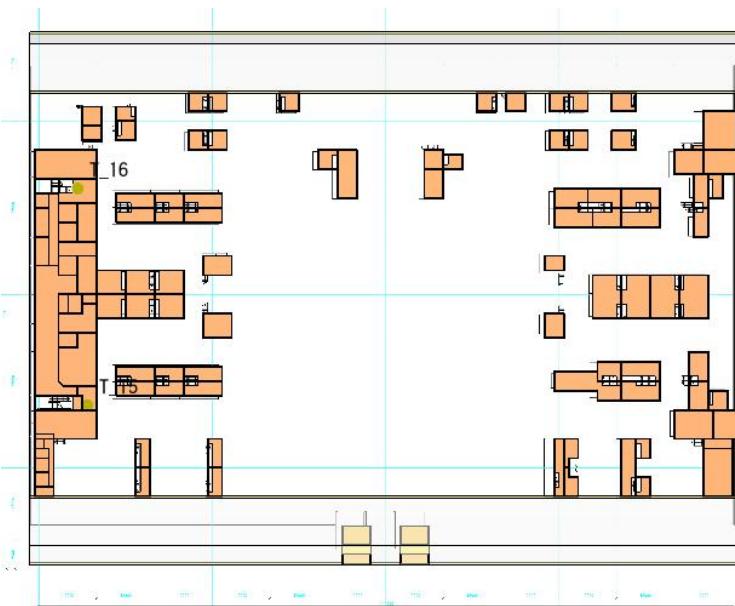
- Точка\_05 – у выходов наружу через вестибюль №№ 10, 11;
- Точка\_06 – у выхода со второго этажа наружу через вестибюль;
- Точка\_07, Точка\_08, Точка\_09, Точка\_10 – перед выходами со второго этажа по открытым лестницам на первый этаж;
- Точка\_11, Точка\_12, Точка\_13, Точка\_14 – перед выходами со второго этажа в лестницы (к выходам №№ 12, 15, 6, 9);
- Точка\_15, Точка\_16 – у выходов из помещений антресоли второго этажа.



Расположение датчиков на первом этаже



Расположение датчиков на втором этаже



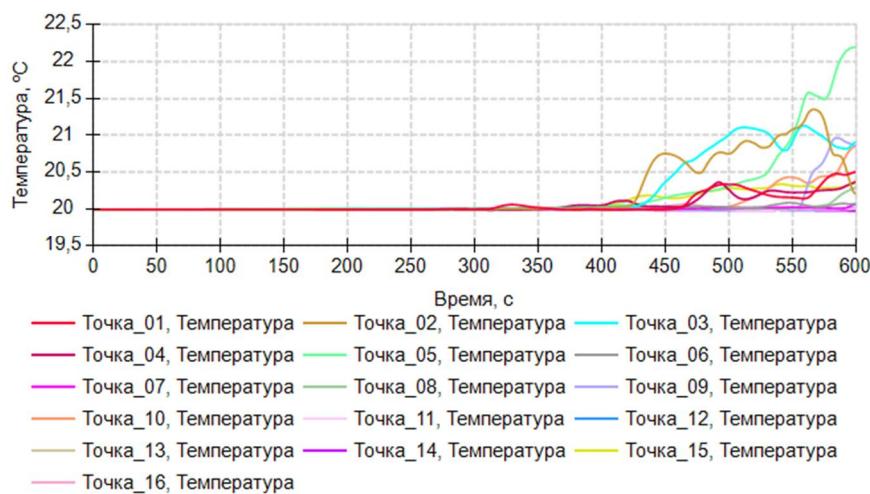
Расположение датчиков на антресоли второго этажа

## 6. Аппаратное обеспечение

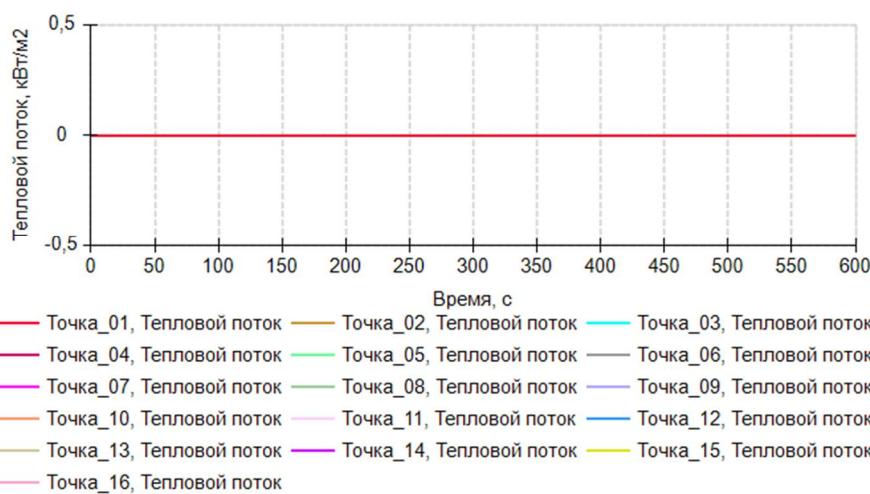
Для выполнения расчетов использовался компьютер с операционной системой Windows Server 2012, с 8-ядерным процессором (2,3 ГГц) и оперативной памятью 8 Гб.

## 7. Результаты моделирования

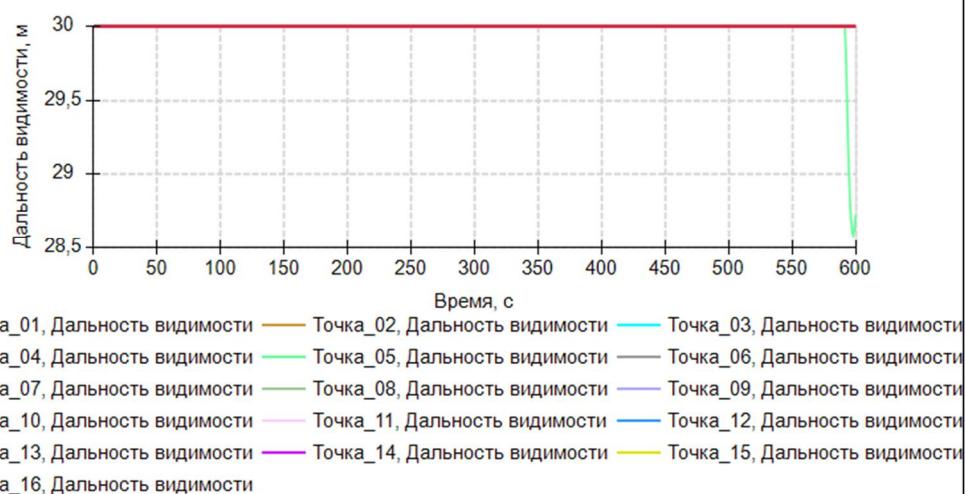
### 7.1. ОФП в расчетных точках



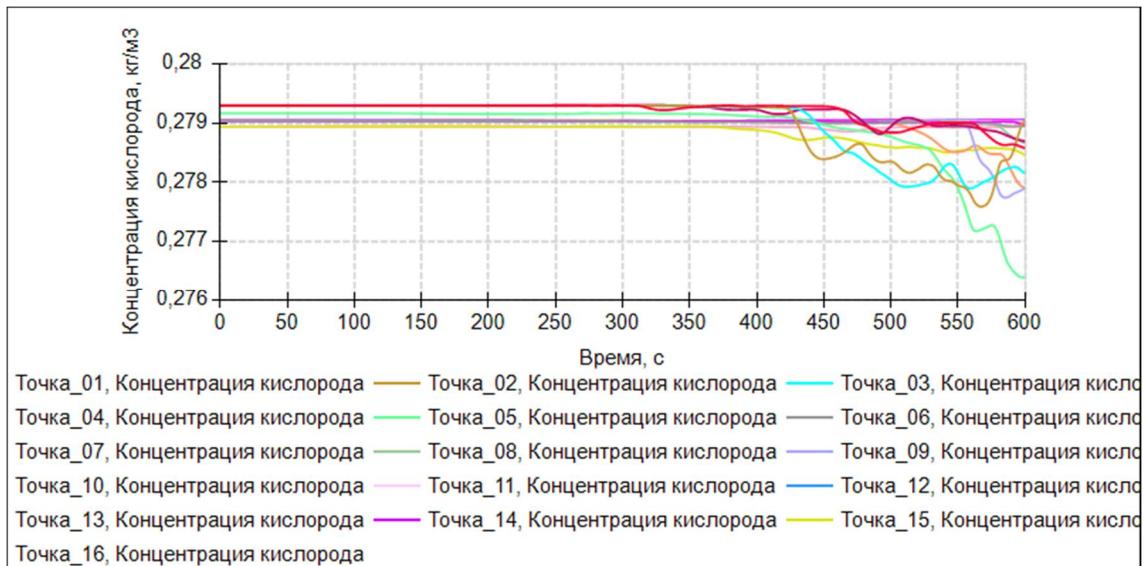
Температура



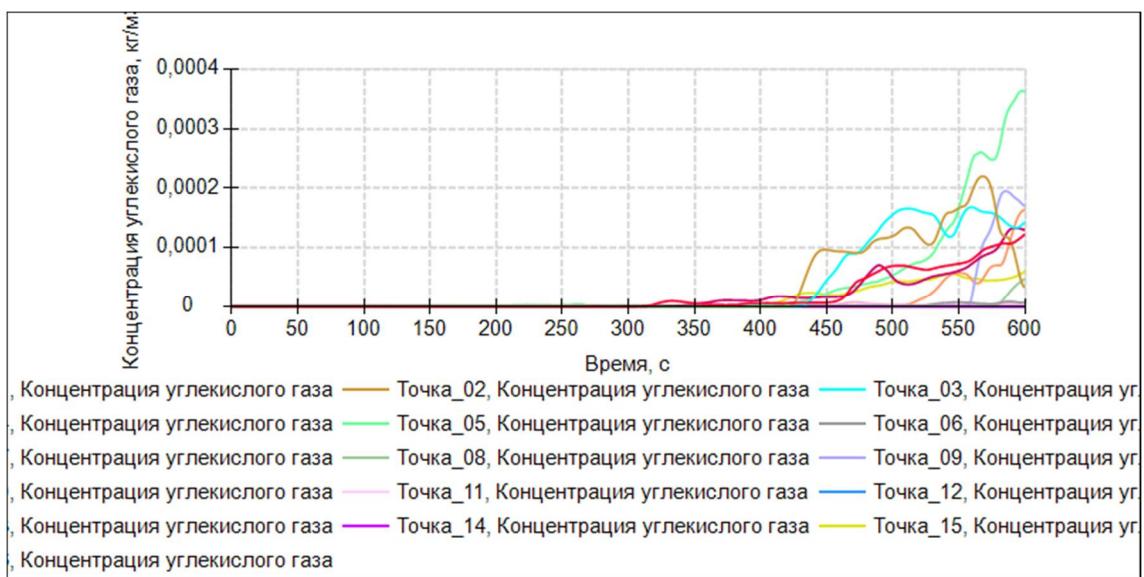
Тепловой поток



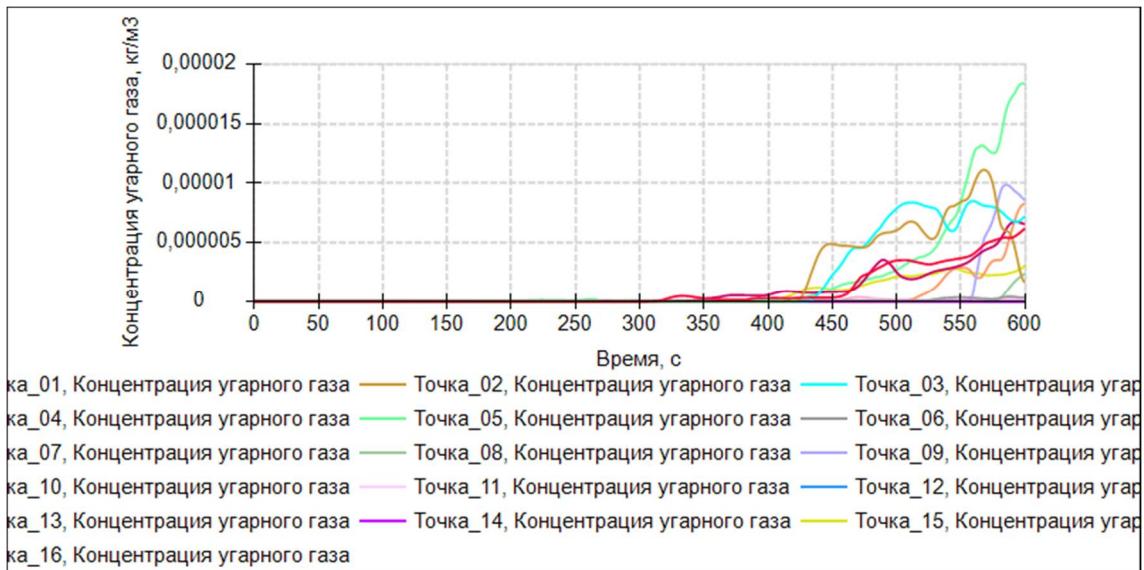
Дальность видимости



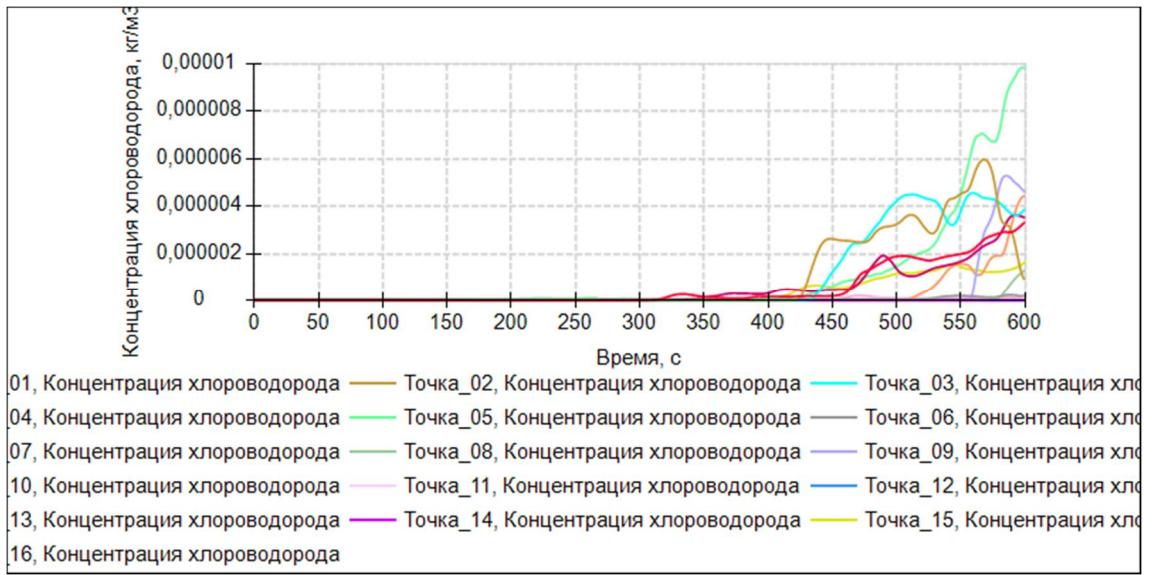
Содержание кислорода



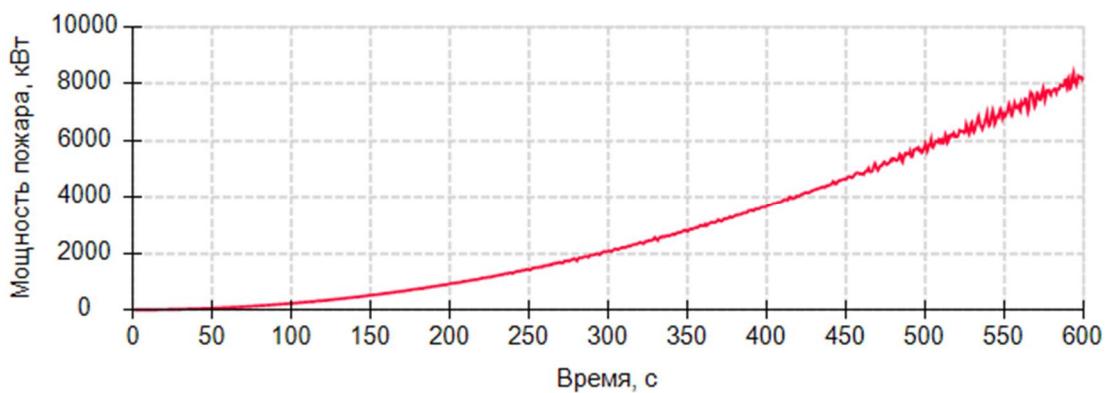
Содержание углекислого газа



Содержание угарного газа



Содержание хлороводорода

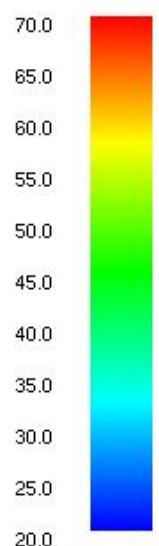
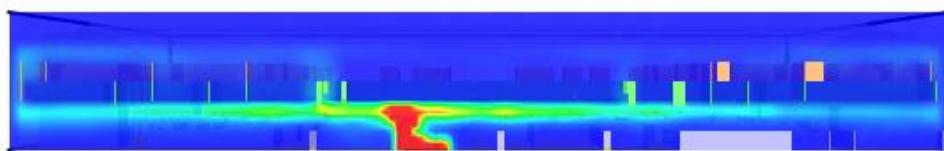


Мощность пожара (мощность тепловыделения)



## 7.2. Поля ОФП на момент 10 минут по оси Б

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
temp  
°C

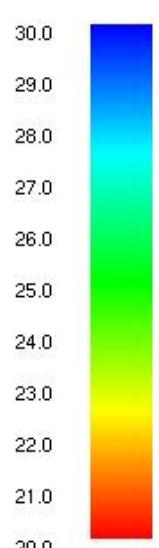
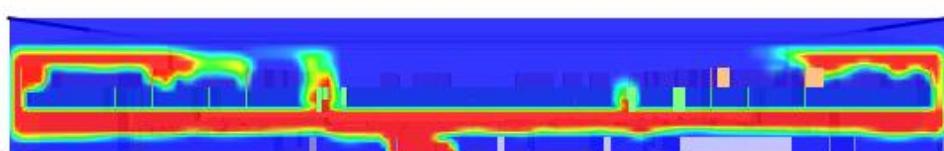
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

Температура

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
VIS\_CO.9H0.1  
m

Frame: 999

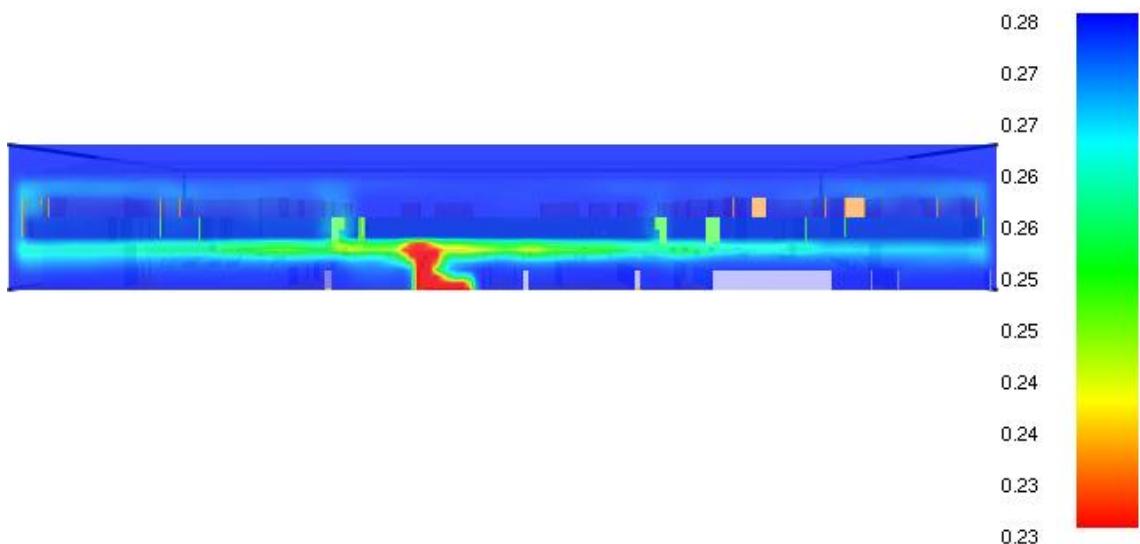
Time: 599.5

mesh: 1

Видимость



Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_O2  
kg/m3

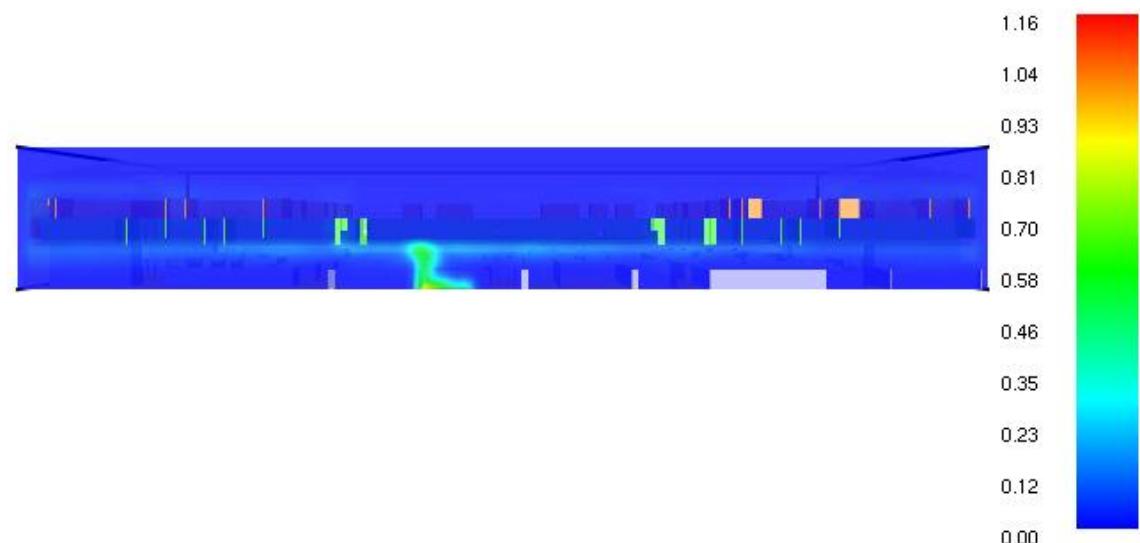
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

Содержание кислорода

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_CO  
kg/m3  
 $\times 10^{-3}$ 

Frame: 999

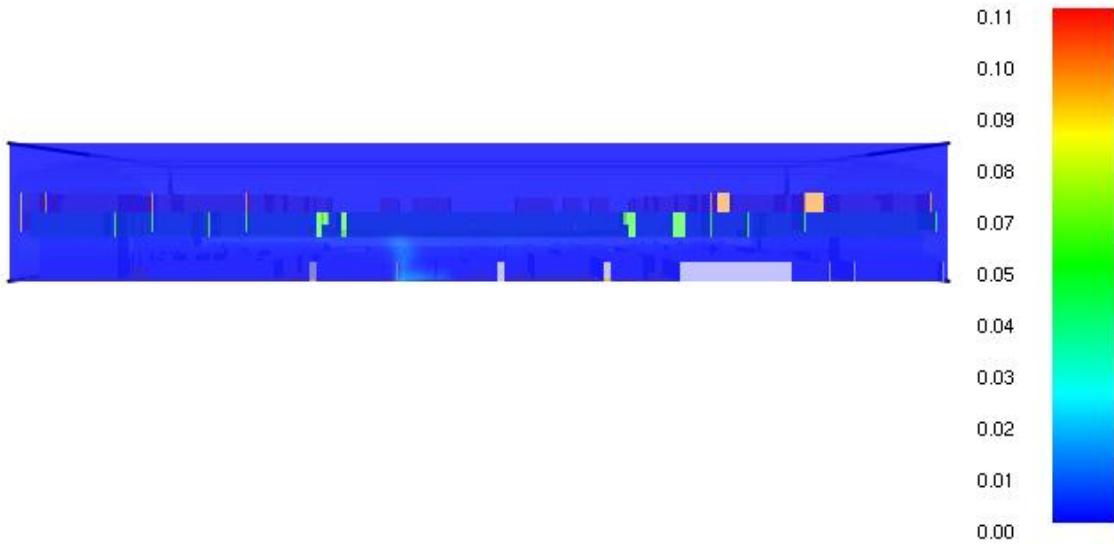
Time: 599.5

mesh: 1

Содержание угарного газа



Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_CO2  
kg/m3

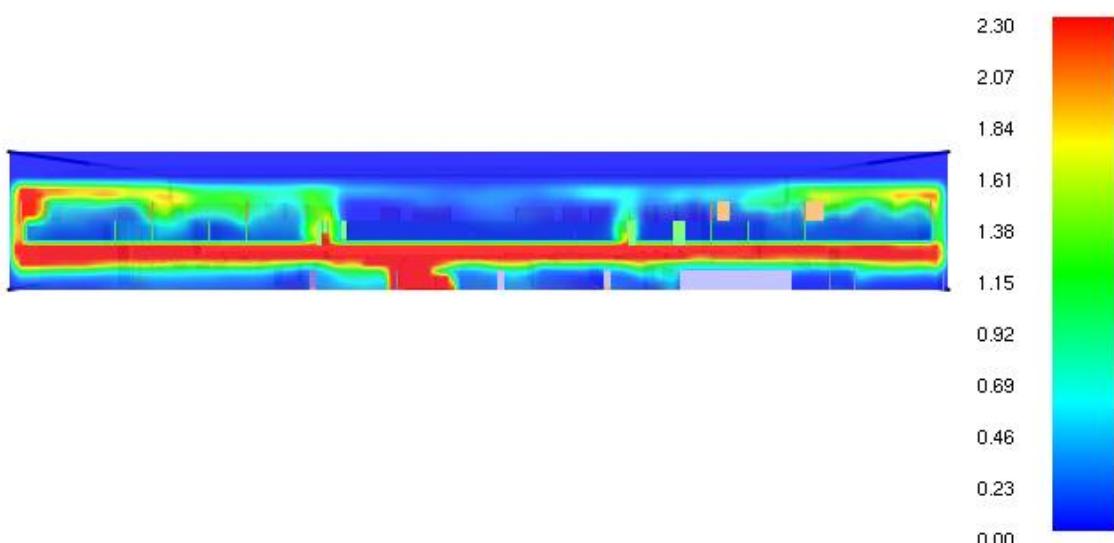
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

### Содержание углекислого газа

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_HCl  
kg/m3  
\*10⁻⁵

Frame: 999

Time: 599.5

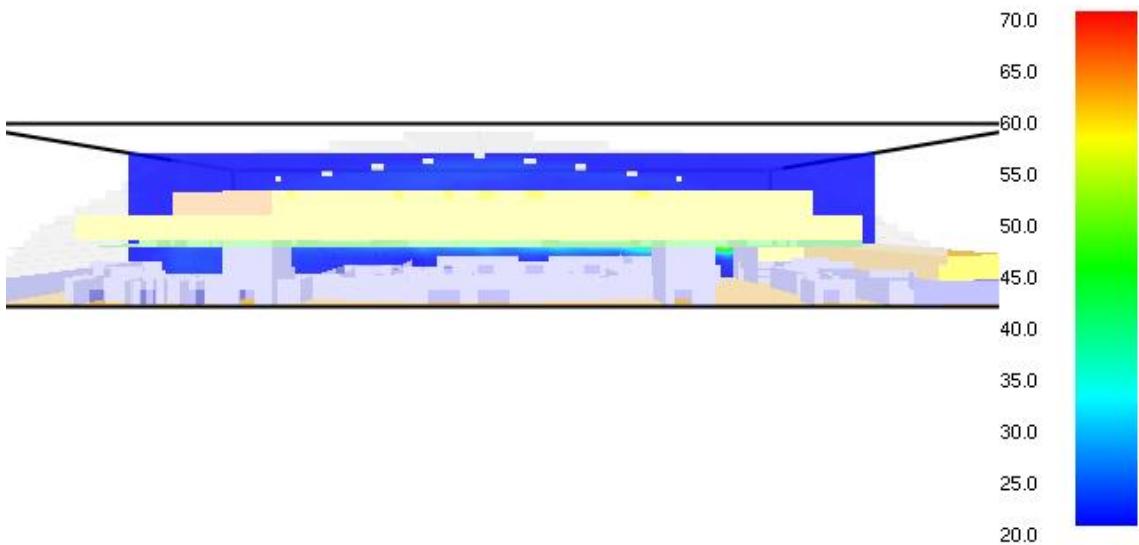
mesh: 1

### Содержание хлороводорода



### 7.3. Поля ОФП на момент 10 минут по осям 6-7

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
temp  
°C

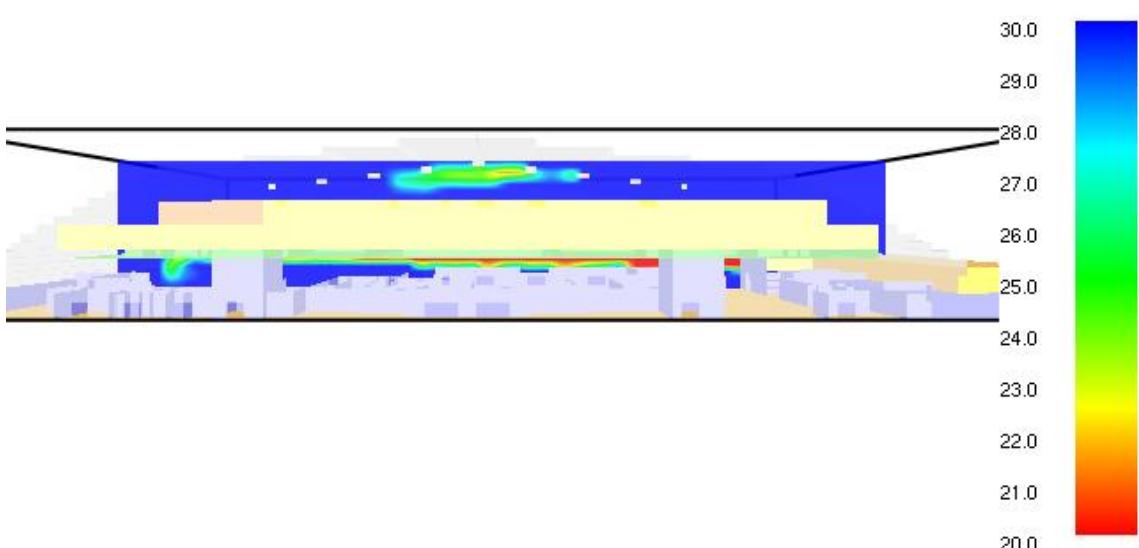
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

Температура

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
VIS\_CO.9H0.1  
m

Frame: 999

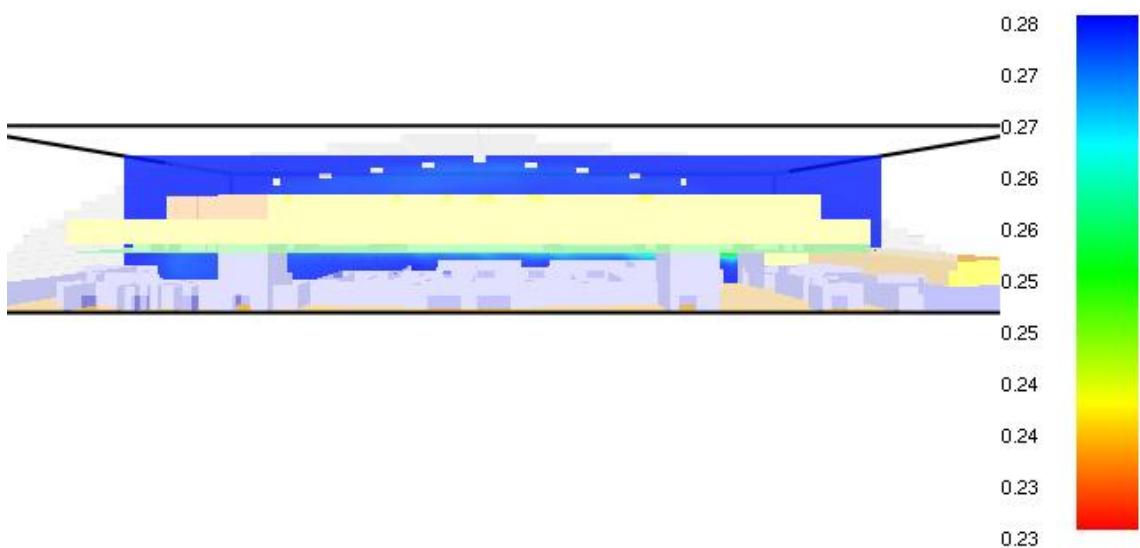
Time: 599.5

mesh: 1

Видимость



Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_02  
kg/m3

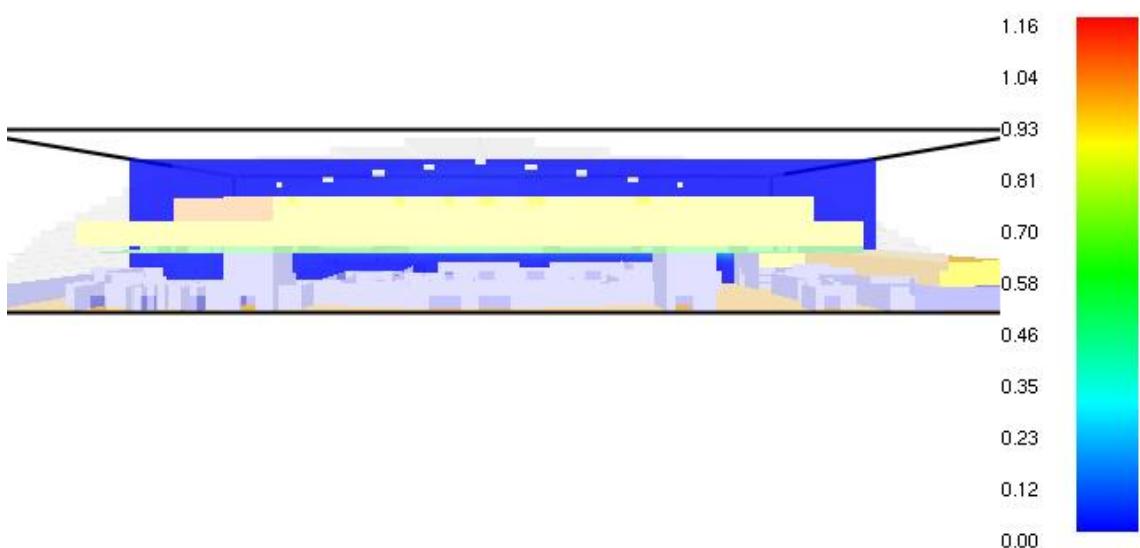
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

### Содержание кислорода

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_CO  
kg/m3  
\*10^-3

Frame: 999

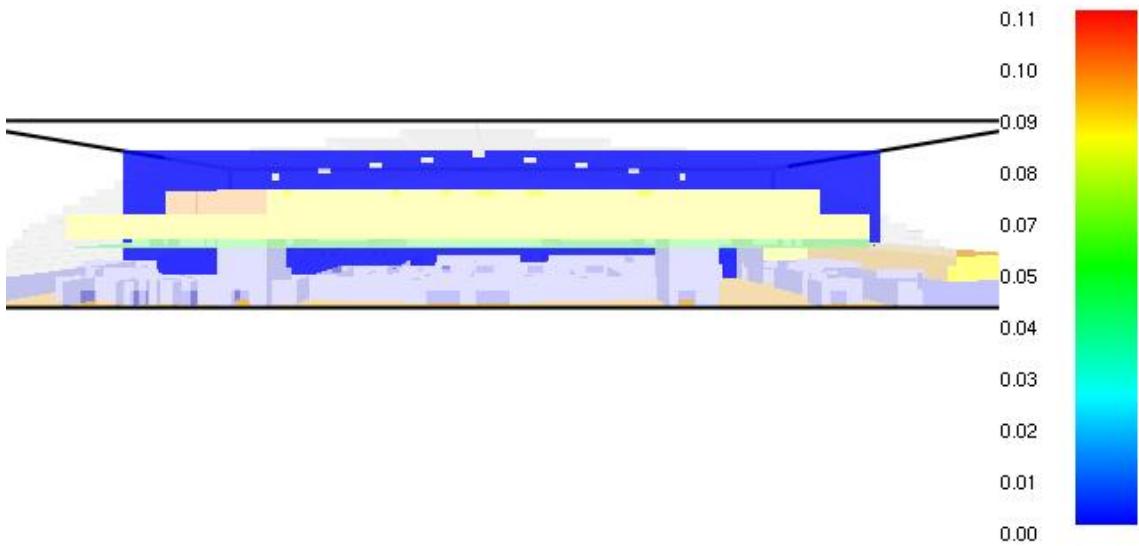
Time: 599.5

mesh: 1

### Содержание угарного газа



Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_CO2  
kg/m3

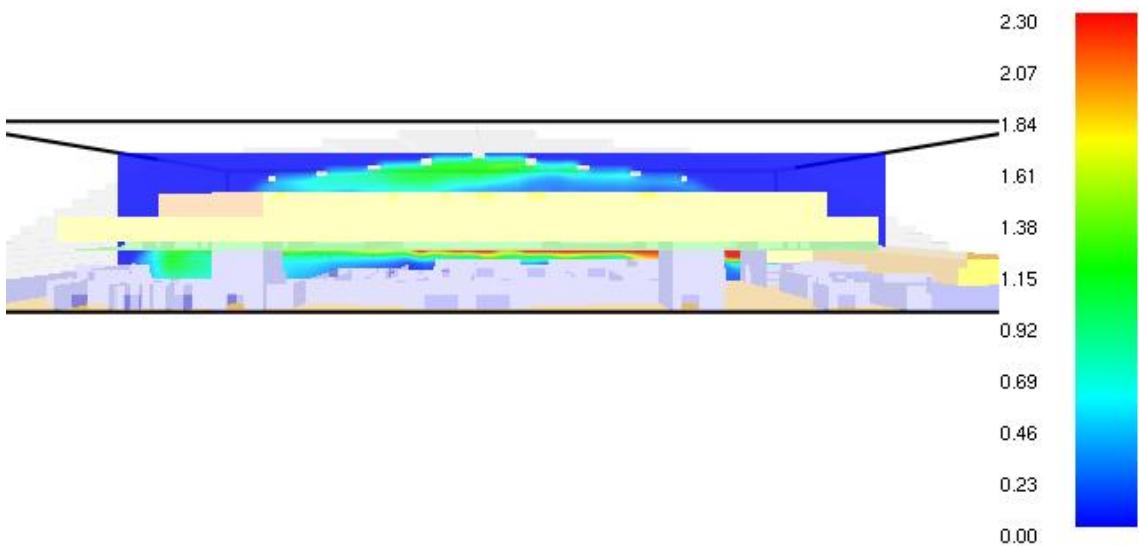
Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

Содержание углекислого газа

Smokeview 6.1.11 – Jul 16 2014

Slice  
rho\_HCl  
kg/m3  
 $\times 10^{-5}$ 

Frame: 999

Time: 599.5

mesh: 1

Содержание хлороводорода

## 7.4. Время блокирования

| Расч. точка | T     | O2    | Видимость | HCl   | CO2   | CO    | Тепловой поток |
|-------------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|----------------|
| Точка_01    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_02    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_03    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_04    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_05    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_06    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_07    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_08    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_09    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_10    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_11    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_12    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_13    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_14    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_15    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |
| Точка_16    | > 600 | > 600 | > 600     | > 600 | > 600 | > 600 | > 600          |

Блокирование путей эвакуации опасными факторами пожара в течение 10 минут горения – не наступило.

## 8. Список литературы

1. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition.– 2015.
2. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition.– 2015.
3. Абашкин А.А. и др. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». – М.: ВНИИПО, 2012.– 83 с.