

Приложение 3

Компьютерное моделирование развития пожара

Оглавление

1. Аннотация.....	3
2. Цели и задачи	3
3. Расчетная модель	3
4. Расчетные сценарии	5
4.1. Сценарий 1. Пожар в учебном классе на первом этаже	6
4.2. Сценарий 2. Пожар в конференц-зале на втором этаже	6
5. Топология объекта	8
5.1. Вид модели 1 сценария	8
5.2. Вид модели 2 сценария	9
5.3. Вентиляция	10
5.4. Расчетные точки	10
6. Аппаратное обеспечение	11
7. Результаты моделирования	12
7.1. Сценарий 1	12
7.1.1. ОФП в расчетных точках	12
7.1.2. Поля ОФП на уровне 1,7 м.....	15
7.1.3. Время блокирования.....	21
7.2. Сценарий 2	22
7.2.1. ОФП в расчетных точках	22
7.2.2. Поля ОФП на уровне 1,7 м.....	25
7.2.3. Время блокирования.....	31
8. Список литературы	32

1. Аннотация

В работе описаны расчетная модель и результаты моделирования развития пожара в здании ... 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 лагранжевы 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:

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

где тензор вязких напряжений:

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

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

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

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 μ , k , D в вышеприведенных уравнениях не могут использоваться напрямую и заменяются выражениями, моделирующими их воздействие

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2 \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr_t} ; \quad (\rho D)_{t,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}$$

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. Расчетные сценарии

Для целей настоящего расчета в качестве наиболее неблагоприятных рассматриваются два сценария. Первый – возникновение пожара на первом этаже здания в учебном классе вблизи атриума. Продукты горения, выходящие

из помещения в коридор и атриум могут создать опасность для эвакуирующихся. Второй – возникновение пожара в конференц-зале на 150 мест на втором этаже здания. Воздействие опасных факторов пожара при возможном скоплении большого количества людей у выходов из конференц-зала и со второго этажа может привести к гибели людей.

4.1. Сценарий 1. Пожар в учебном классе на первом этаже

Пожар возникает в учебном классе на 20 мест на первом этаже здания (поз. 107). Первичным источником зажигания служит малокалорийный источник тепла. Пламя распространяется по горючей нагрузке радиально (форма развития пожара круговая).

Характеристики горючей нагрузки приняты типовые по [3] «Административные помещения, учебные классы школ, ВУЗов, кабинеты поликлиник»:

линейная скорость распространения пламени: 0,0045 м/с;

удельная скорость выгорания: 0,0137 кг/м²·с;

низшая теплота сгорания: 14000 кДж/кг;

удельное дымовыделение: 47,7 Нп·м²/кг;

удельное выделение углекислого газа: 1,478 кг/кг;

удельное выделение угарного газа: 0,03 кг/кг;

удельное выделение HCl: 0,0058 кг/кг;

удельное потребление кислорода: 1,369 кг/кг.

В помещении имеются две двери шириной 1200 мм и высотой 2100 мм, через которые опасные факторы пожара поступают в общий коридор (поз. 106, 113б), затем в атриум (поз. 113а).

Моделирование выполняется с учетом работы системы вентиляции и дымоудаления: с учетом опускания противодымных штор в атриумах, притока воздуха через тамбуры 121, 112 и удаления продуктов горения через люки и фрамуги дымоудаления.

4.2. Сценарий 2. Пожар в конференц-зале на втором этаже

Пожар возникает в конференц-зале на 150 посадочных мест на втором этаже здания (поз. 214). Первичным источником зажигания служит малокалорийный источник тепла. Пламя распространяется по горючей нагрузке радиально (форма развития пожара круговая).

Характеристики горючей нагрузки приняты типовые по [3] «Административные помещения, учебные классы школ, ВУЗов, кабинеты поликлиник»:

линейная скорость распространения пламени: 0,0045 м/с;

удельная скорость выгорания: 0,0137 кг/м²·с;

низшая теплота сгорания: 14000 кДж/кг;

удельное дымовыделение: 47,7 Нп·м²/кг;

удельное выделение углекислого газа: 1,478 кг/кг;

удельное выделение угарного газа: 0,03 кг/кг;

удельное выделение HCl: 0,0058 кг/кг;

удельное потребление кислорода: 1,369 кг/кг.

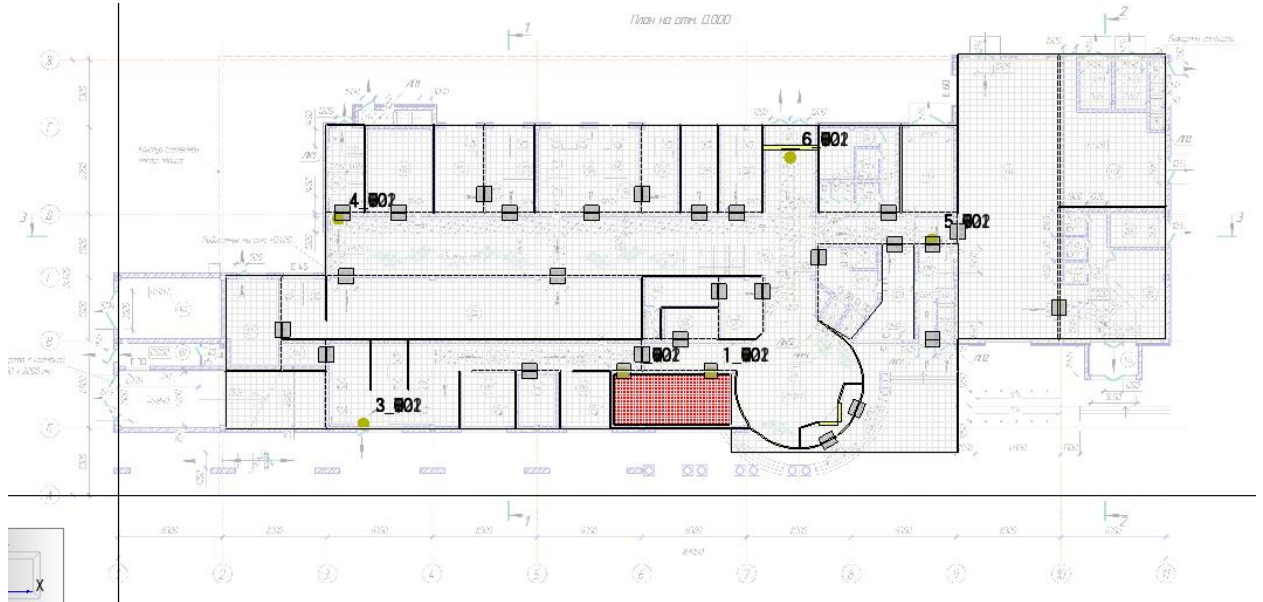
В помещении имеются три двери шириной 1400 мм и высотой 2100 мм. Дверь, ведущая наружу, принимается закрытой (блокированной), через две другие двери опасные факторы пожара поступают в общий коридор (поз. 212а, 212б).

Моделирование выполняется с учетом опускания противодымных штор и распространения продуктов горения только в пределах этажа.

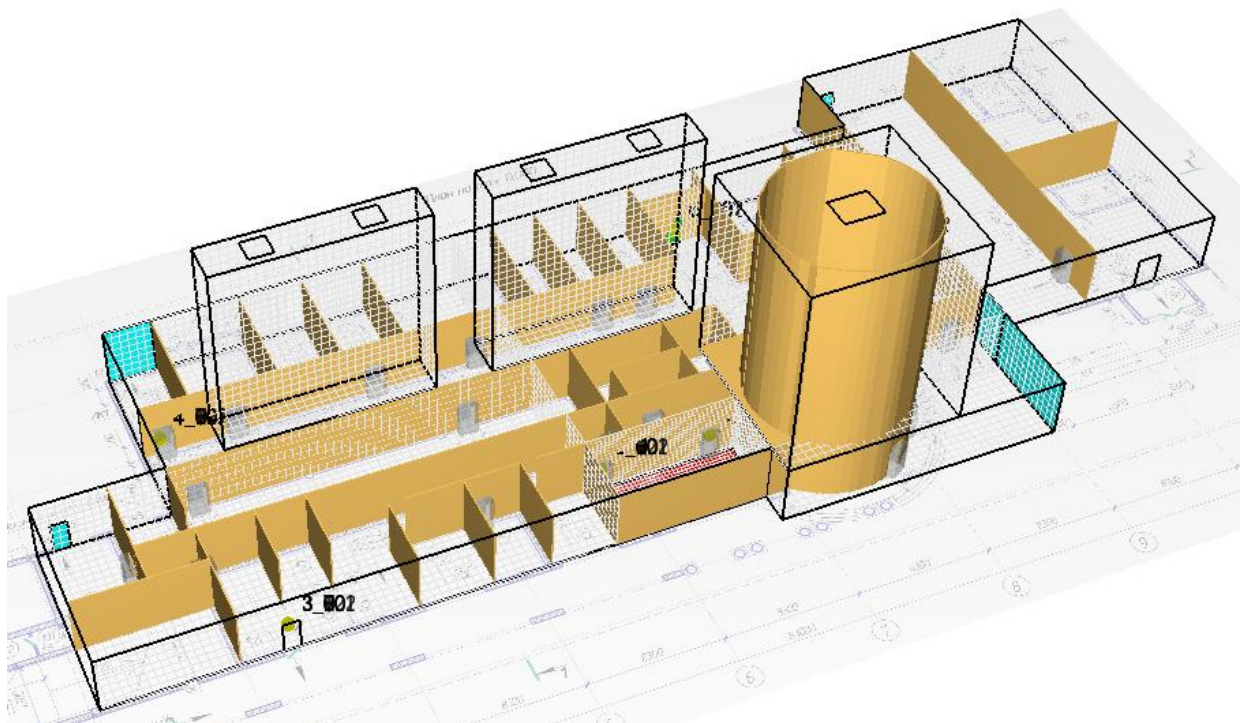
5. Топология объекта

Модель здания для использования в программе FDS выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2014.

5.1. Вид модели 1 сценария



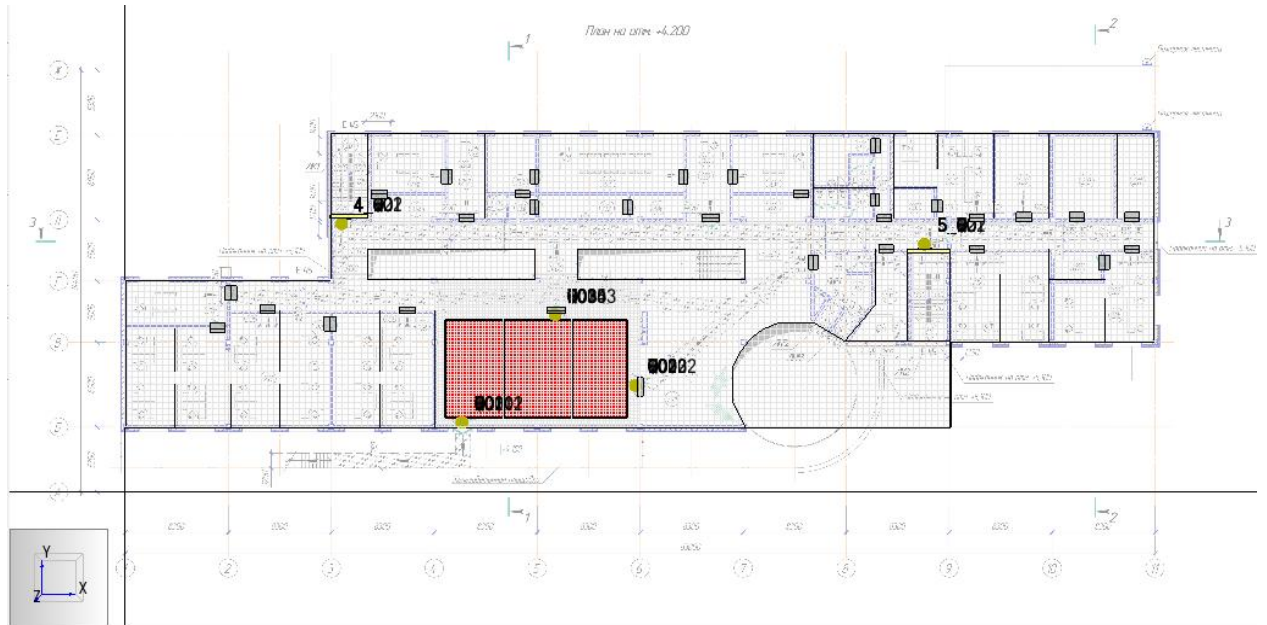
Модель этажа на отм. +0.000



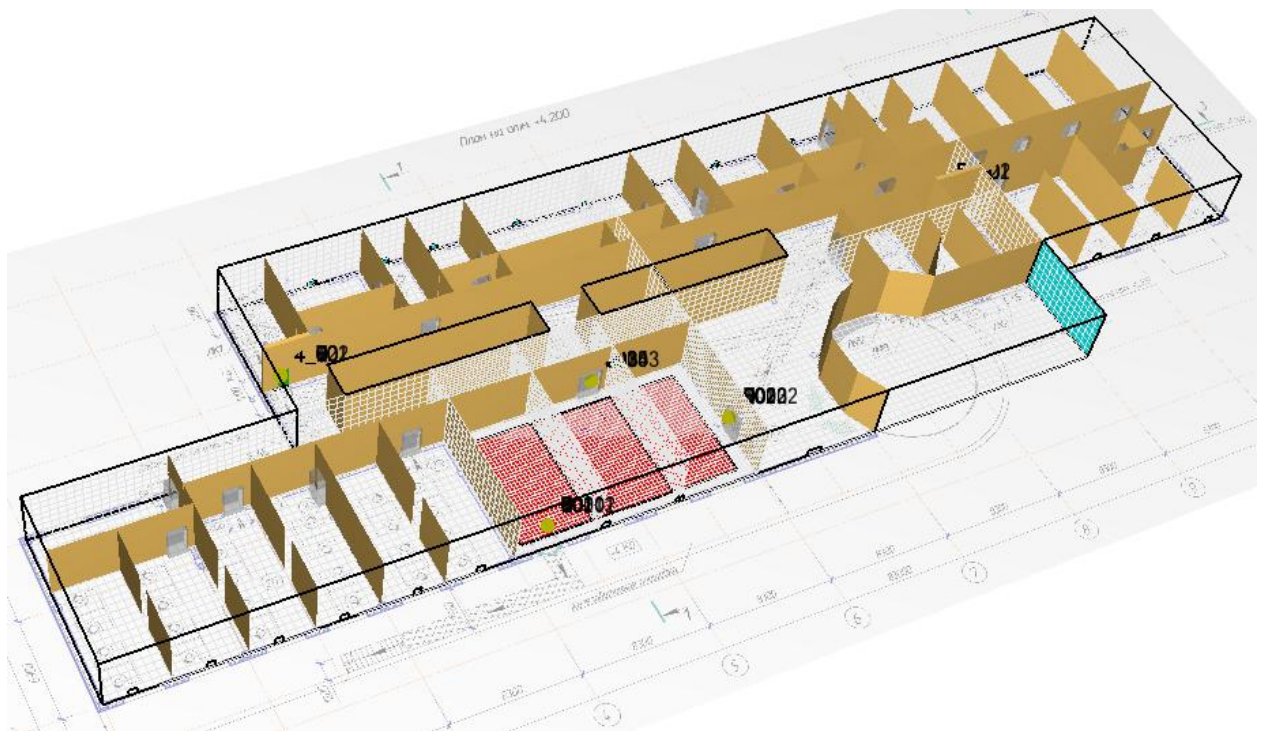
Общий вид модели

5.2. Вид модели 2 сценария

Объем блока разбит на 16 расчетных сеток. Сетки имеют различные размеры и количество ячеек – возле источника пожара и расчетных ферм ячейки сетки меньше, вдали от источника ячейки больше. Это позволяет, во-первых, повысить точность расчета, во-вторых, обеспечить более равномерную загрузку расчетных мощностей.



Модель этажа на отм. +4.200



Общий вид модели

5.3. Вентиляция

Приток через тамбуры поз. 112 и поз. 121 составляет соответственно 42550 м³/час и 57500 м³/час.

Удаление продуктов горения из зоны атриума поз. 314а осуществляется через три фрамуги дымоудаления общей площадью 5,1 м² с расходом 42550 м³/час.

Удаление продуктов из зоны пассажа поз. 410а осуществляется через четыре люка дымоудаления площадью 4,5 м² каждый с общим расходом 57500 м³/час.

5.4. Расчетные точки

Для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара используются соответствующие датчики, установленные для сценария 1:

- Точка_01, Точка_02 – в помещении очага пожара вблизи выходов;
- Точка_03 – в осях Б – 3-4 у выхода наружу;
- Точка_04 – в осях Д – 3 перед выходом с этажа в лестничную клетку;
- Точка_05 – в осях Г-Д – 8-9 перед выходом с этажа в лестничную

клетку;

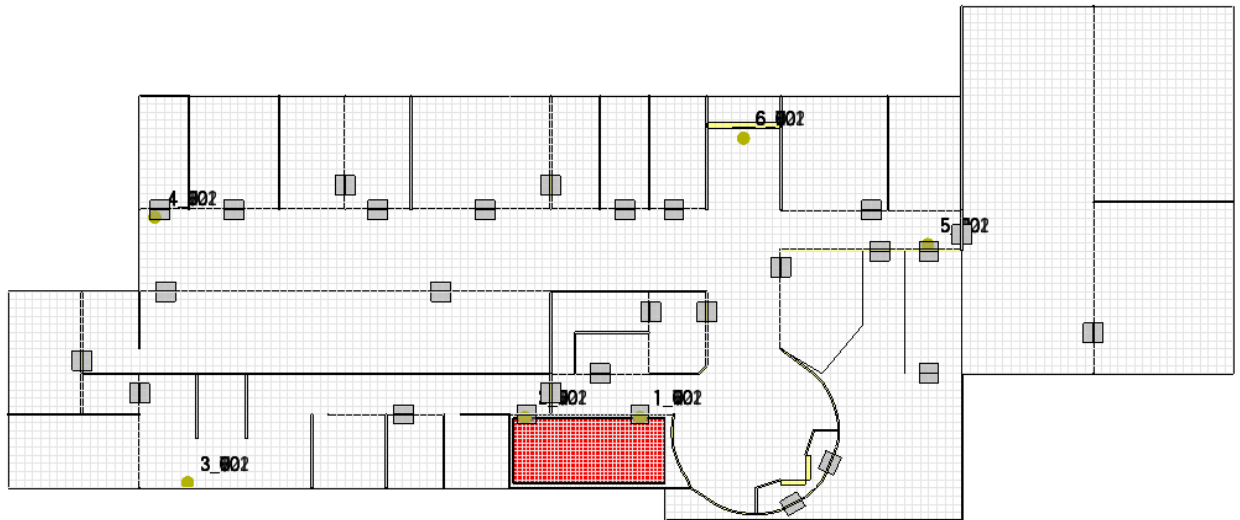
- Точка_06 – в осях Д-Е – 7-8 перед выходом с этажа в тамбур и наружу;
- для сценария 2:

– Точка_01 – в помещении очага пожара перед выходом непосредственно наружу;

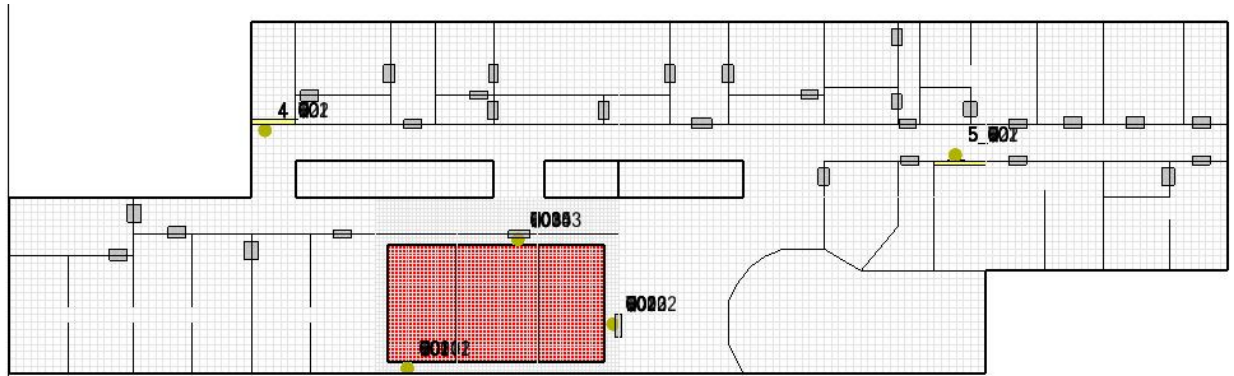
– Точка_02, Точка_03 – в помещении очага пожара вблизи выходов в коридор;

- Точка_04 – в осях Д – 3-4 перед выходом с этажа в лестничную клетку;
- Точка_05 – в осях Г-Д – 8-9 перед выходом с этажа в лестничную

клетку.



Расположение датчиков (Сценарий 1)



Расположение датчиков (Сценарий 2)

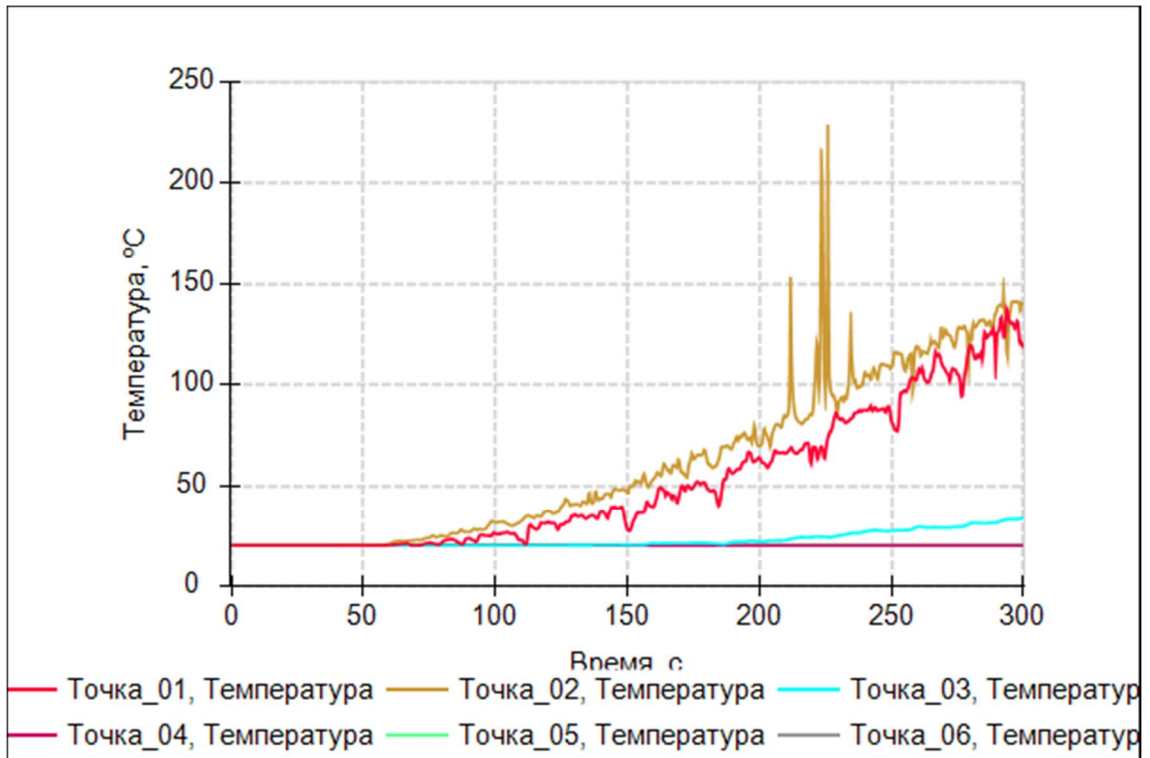
6. Аппаратное обеспечение

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

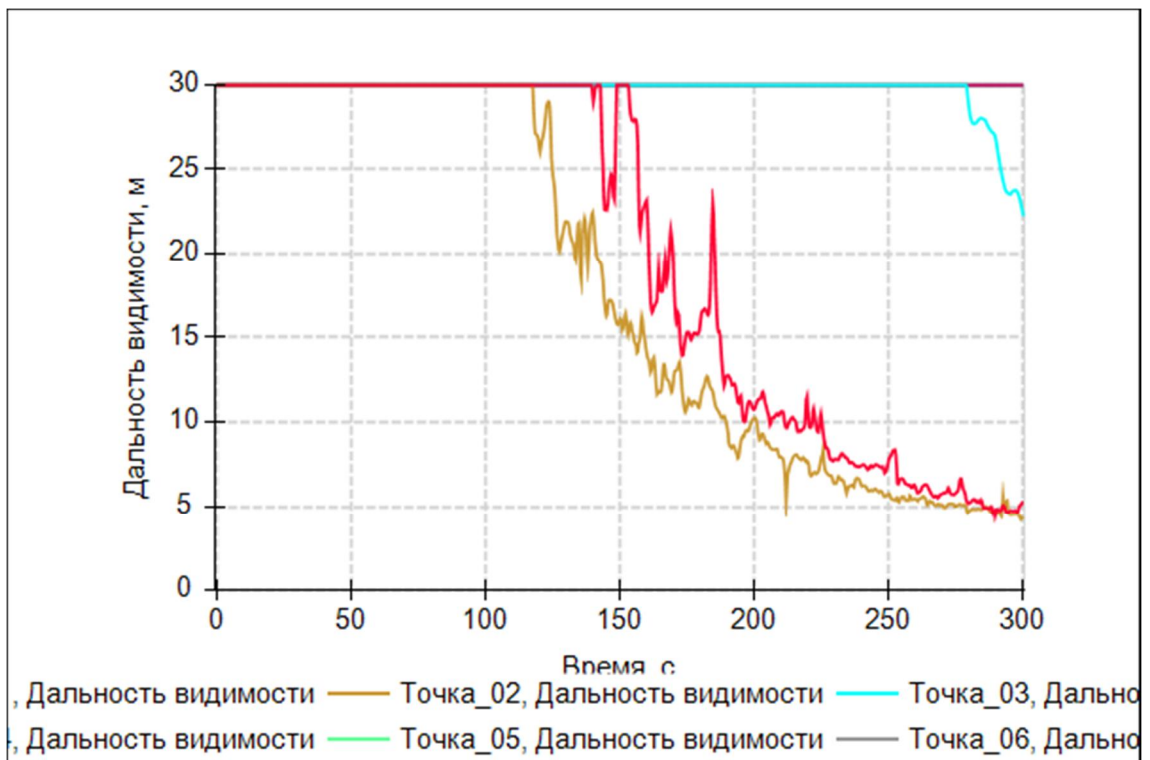
7. Результаты моделирования

7.1. Сценарий 1

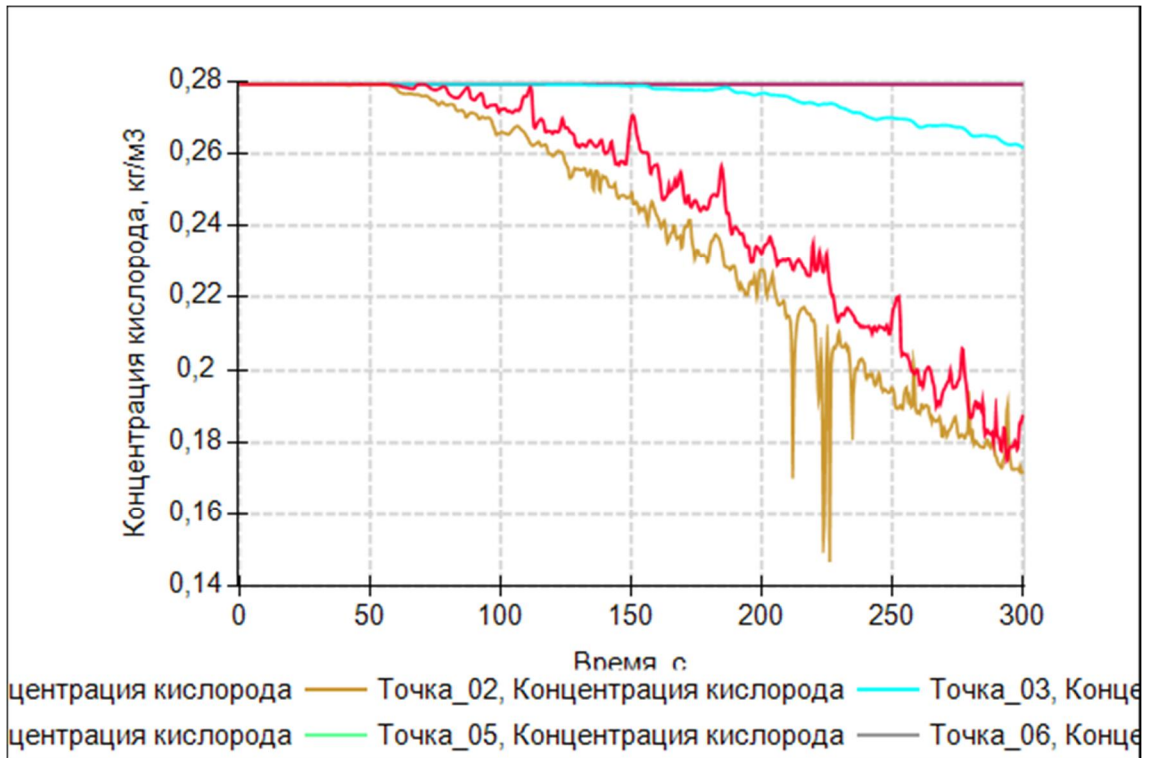
7.1.1. ОФП в расчетных точках



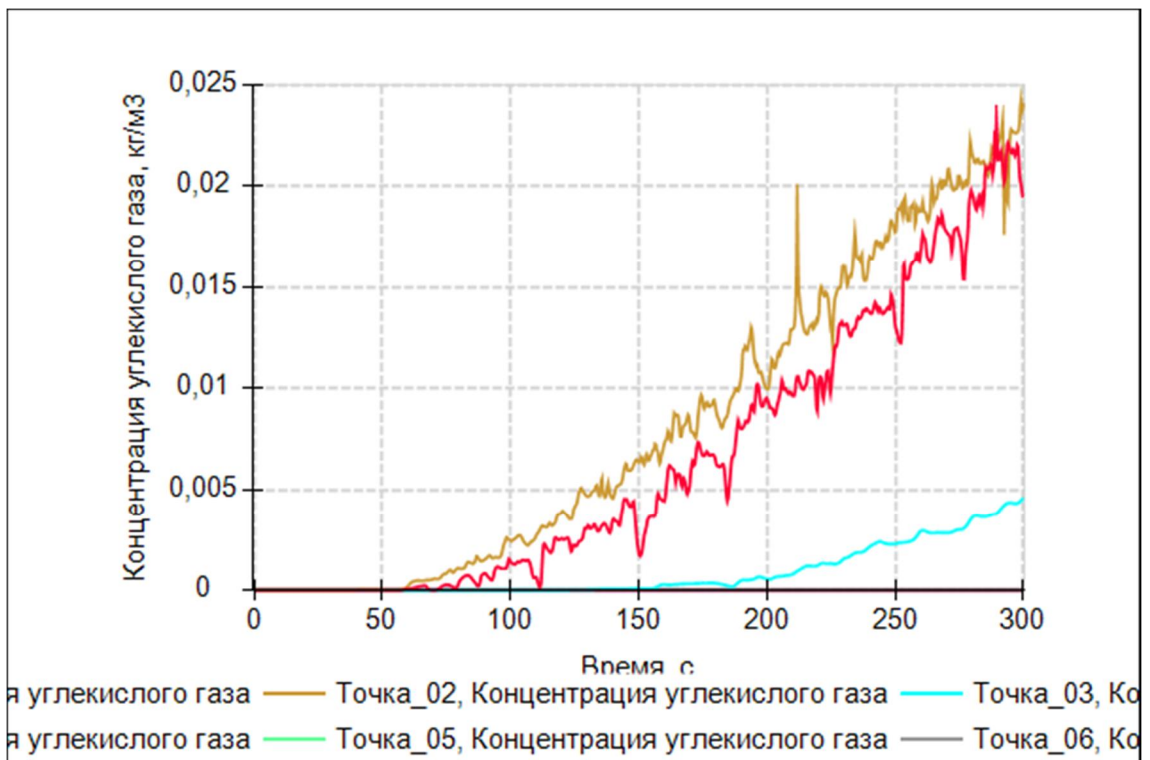
Температура



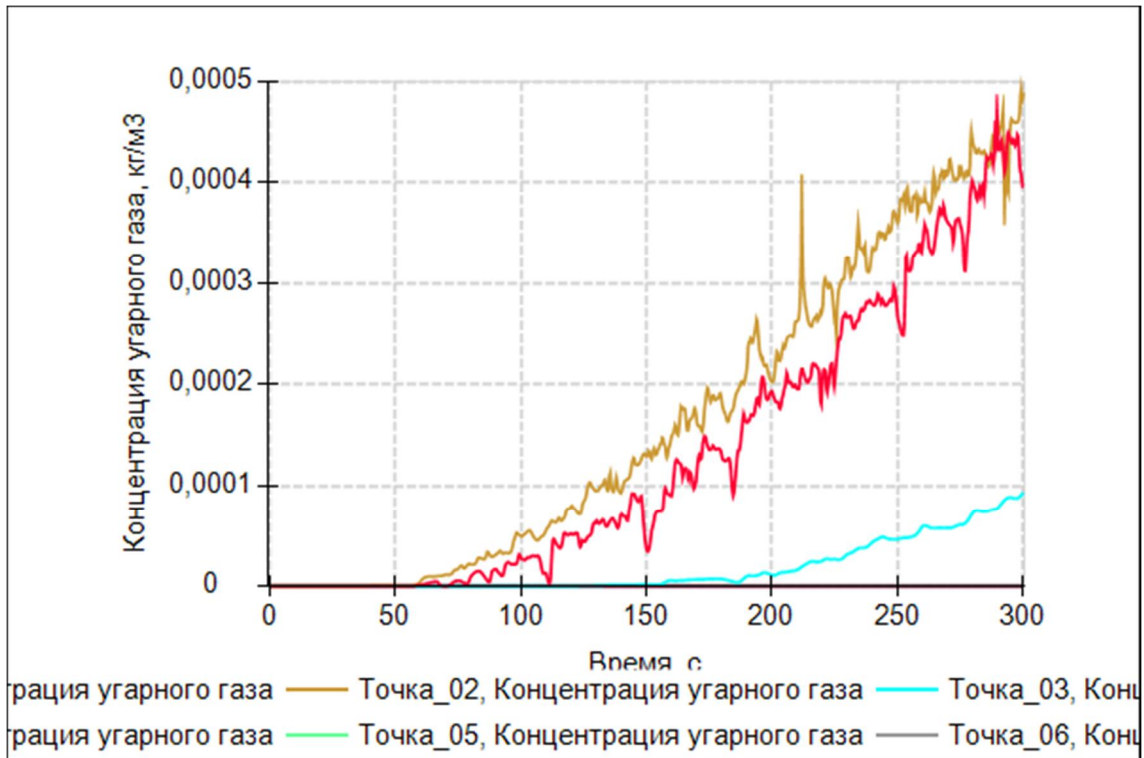
Дальность видимости



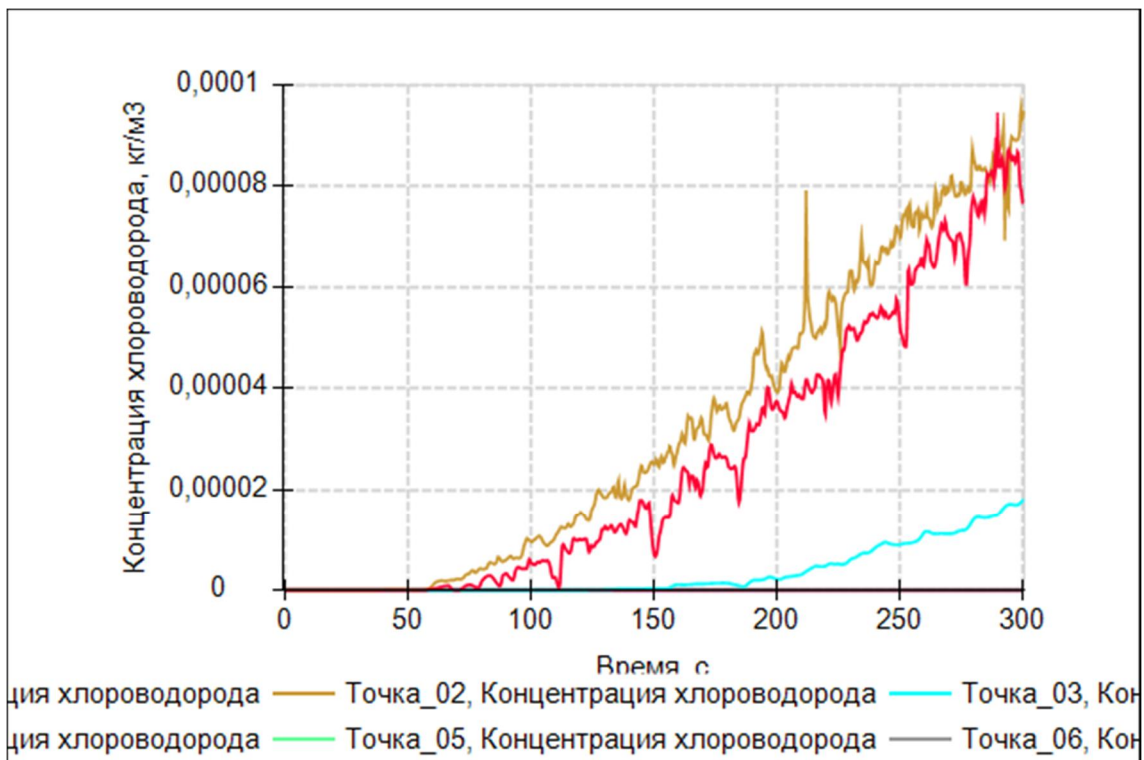
Содержание кислорода



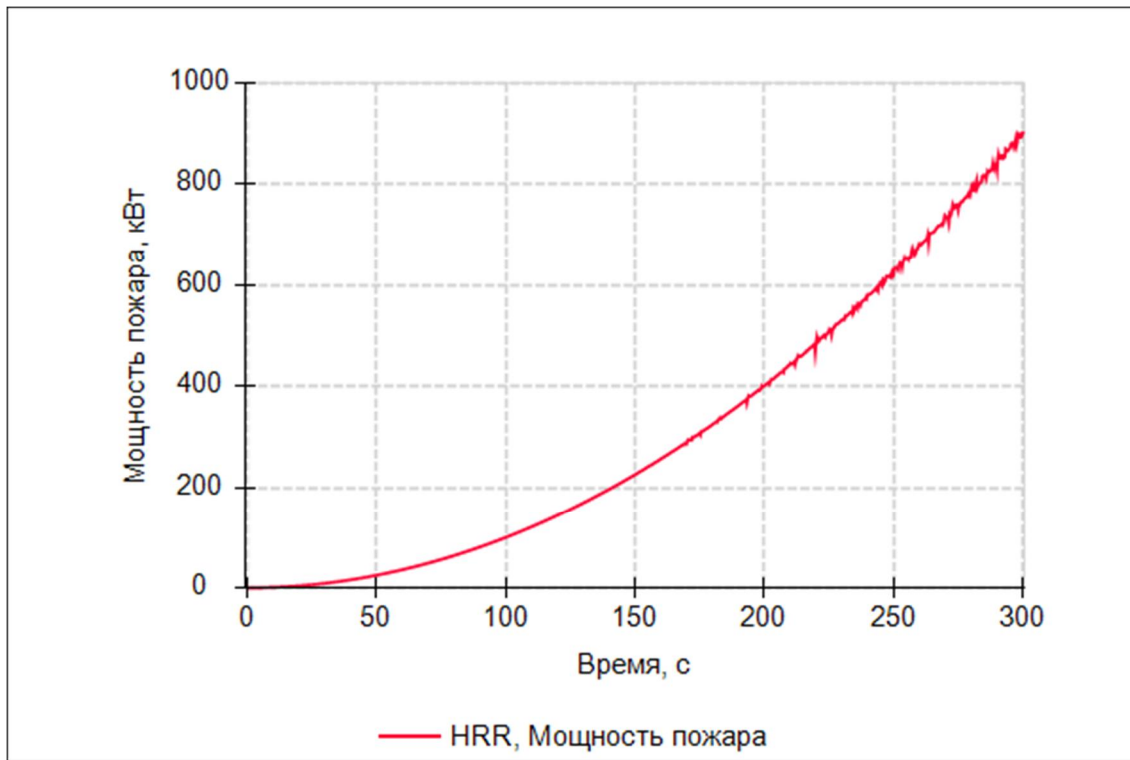
Содержание углекислого газа



Содержание угарного газа



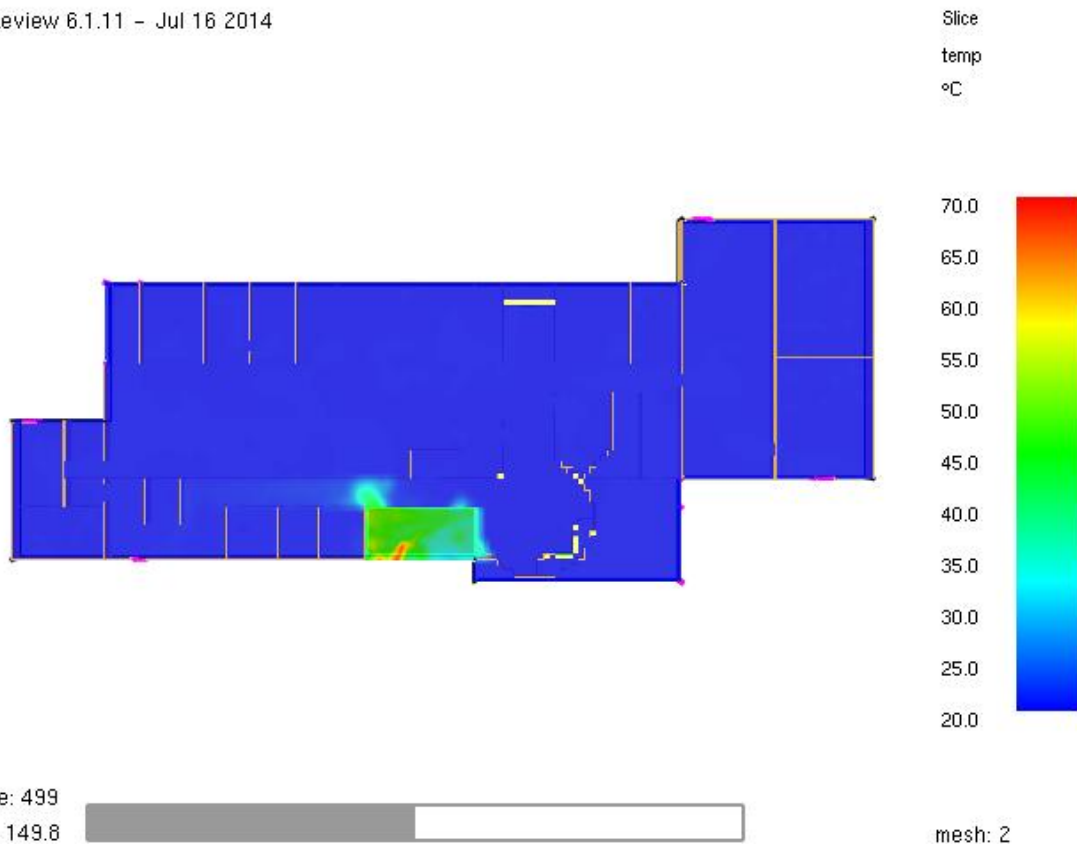
Содержание хлороводорода



Мощность пожара (мощность тепловыделения)

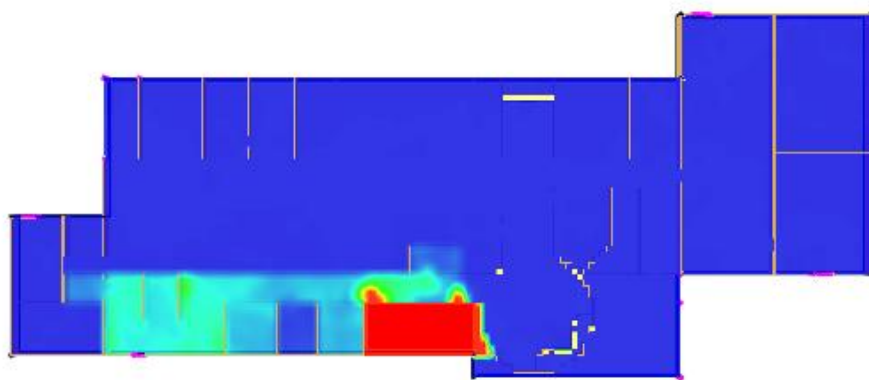
7.1.2. Поля ОФП на уровне 1,7 м

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Температура на момент 150 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
temp
°C

70.0
65.0
60.0
55.0
50.0
45.0
40.0
35.0
30.0
25.0
20.0



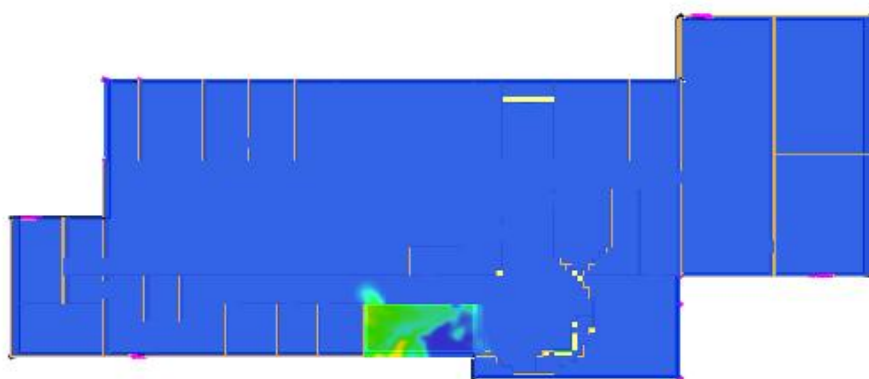
Frame: 999
Time: 299.7



mesh: 2

Температура на момент 300 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
VIS_CO.9H0.1
m

31.5
28.8
26.1
23.4
20.7
18.0
15.3
12.6
9.90
7.20
4.50



Frame: 499
Time: 149.8

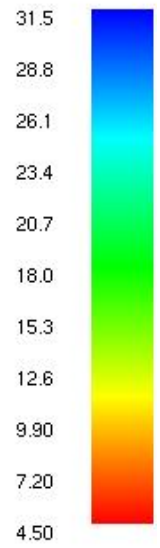
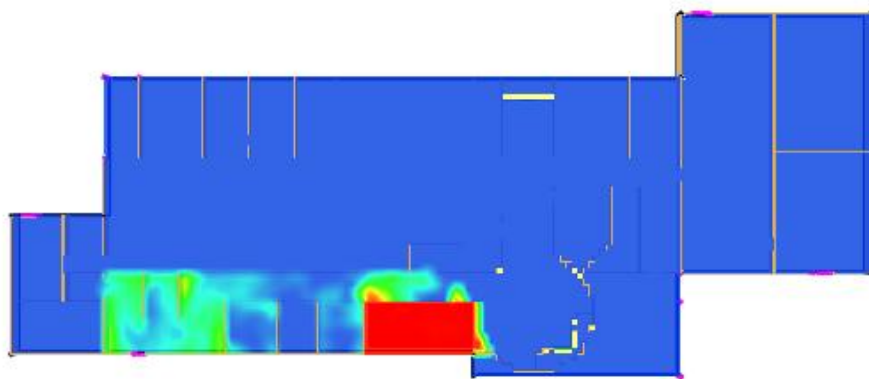


mesh: 2

Видимость на момент 150 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014

Slice
VIS_CO.9H0.1
m



Frame: 999
Time: 299.7

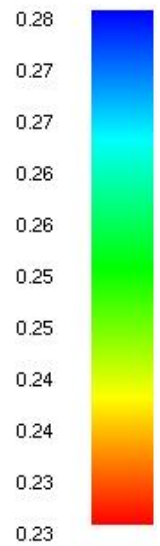
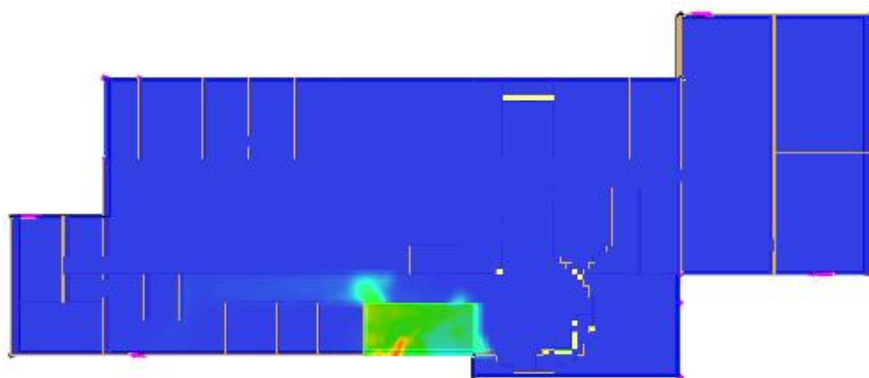


Видимость на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014

Slice
rho_O2
kg/m3



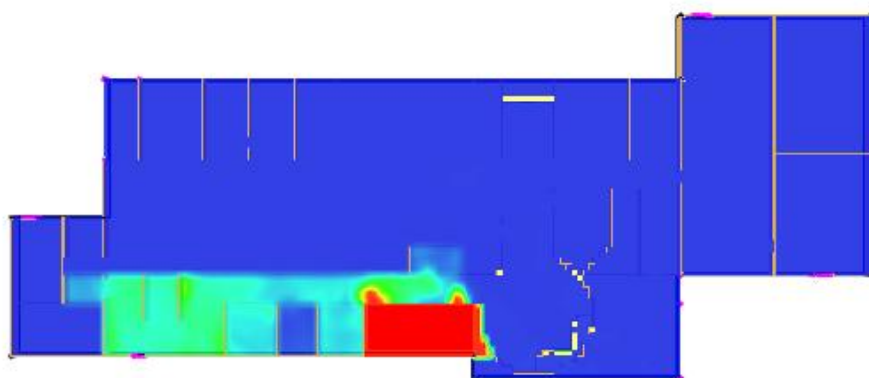
Frame: 499
Time: 149.8



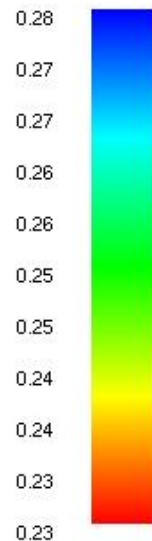
Содержание кислорода на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_O2
kg/m3



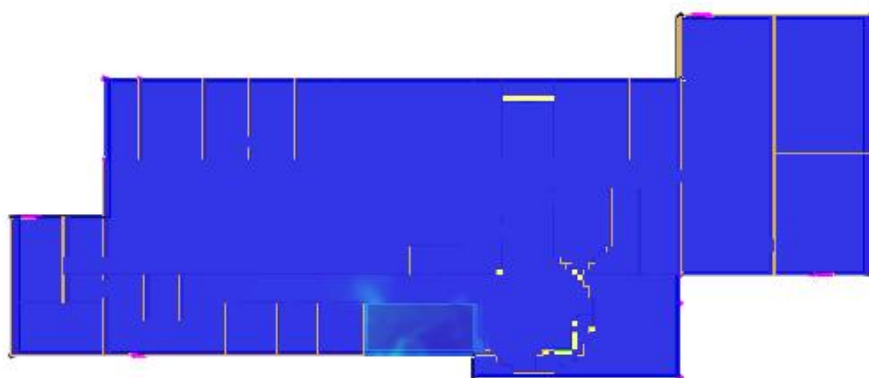
Frame: 999
Time: 299.7



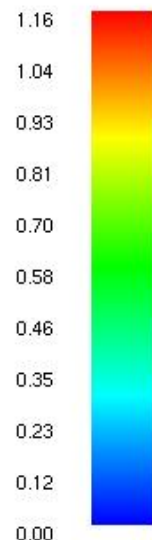
Содержание кислорода на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO
kg/m3
*10^-3



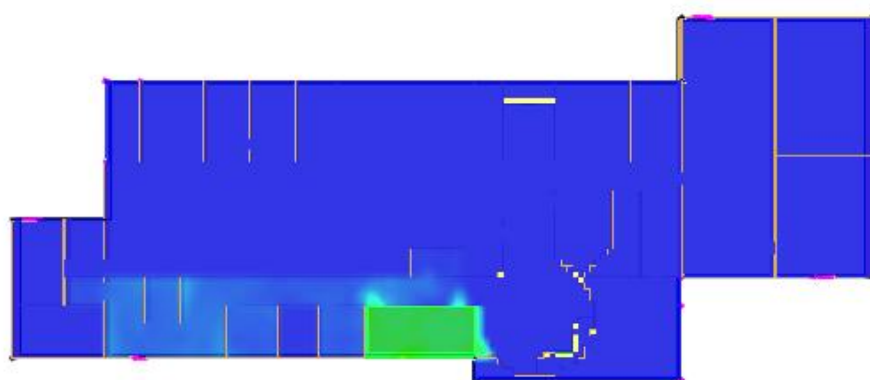
Frame: 499
Time: 149.8



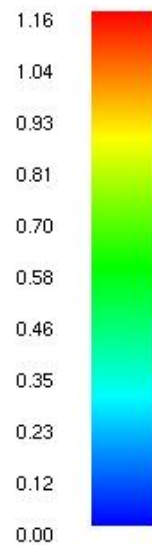
Содержание угарного газа на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO
kg/m3
*10^-3



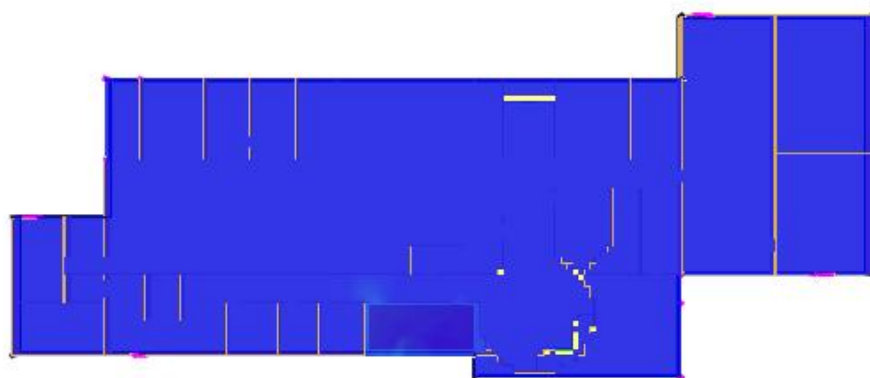
Frame: 999
Time: 299.7



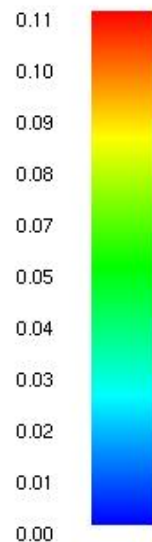
Содержание угарного газа на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO2
kg/m3



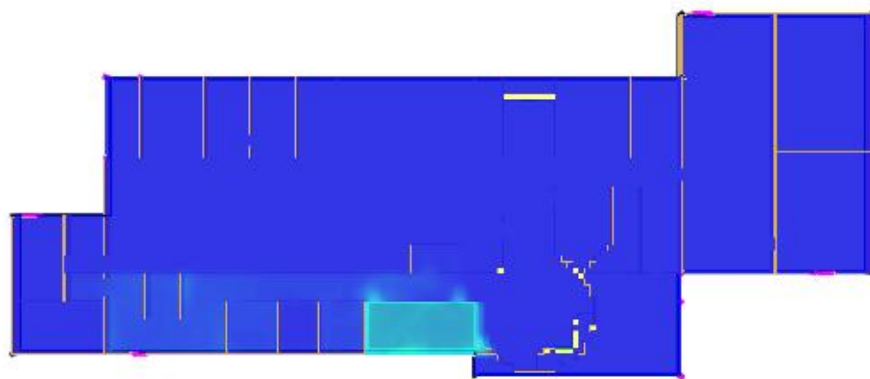
Frame: 499
Time: 149.8



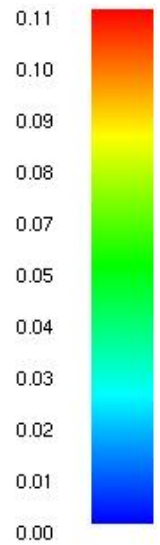
Содержание углекислого газа на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO2
kg/m3



Frame: 999

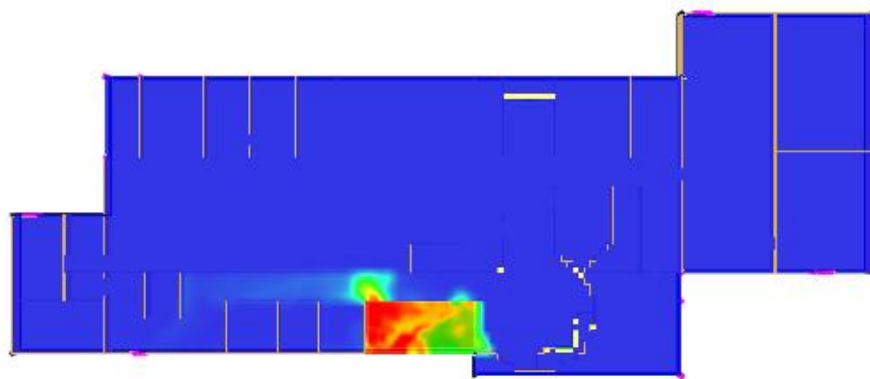
Time: 299.7



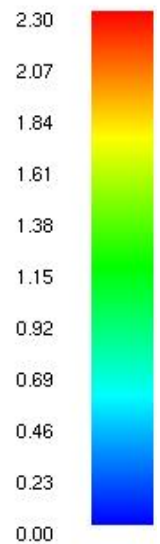
mesh: 2

Содержание углекислого газа на момент 300 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_HCl
kg/m3
*10^-5



Frame: 499

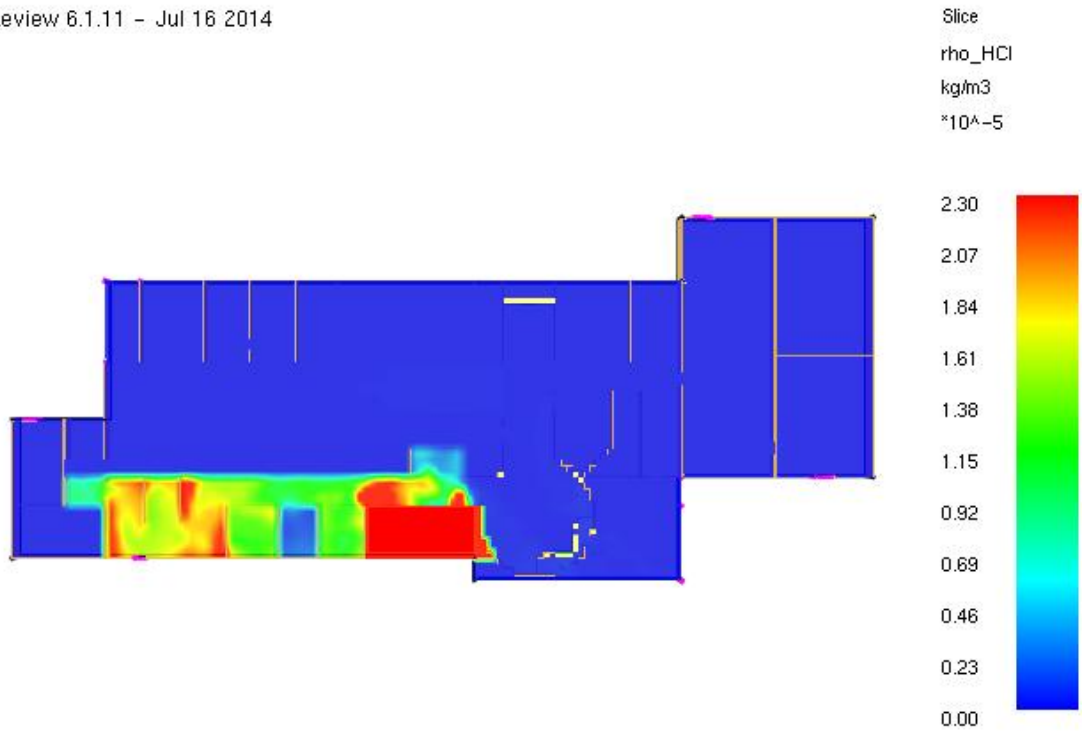
Time: 149.8



mesh: 2

Содержание хлороводорода на момент 150 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Frame: 999

Time: 299.7

mesh: 2

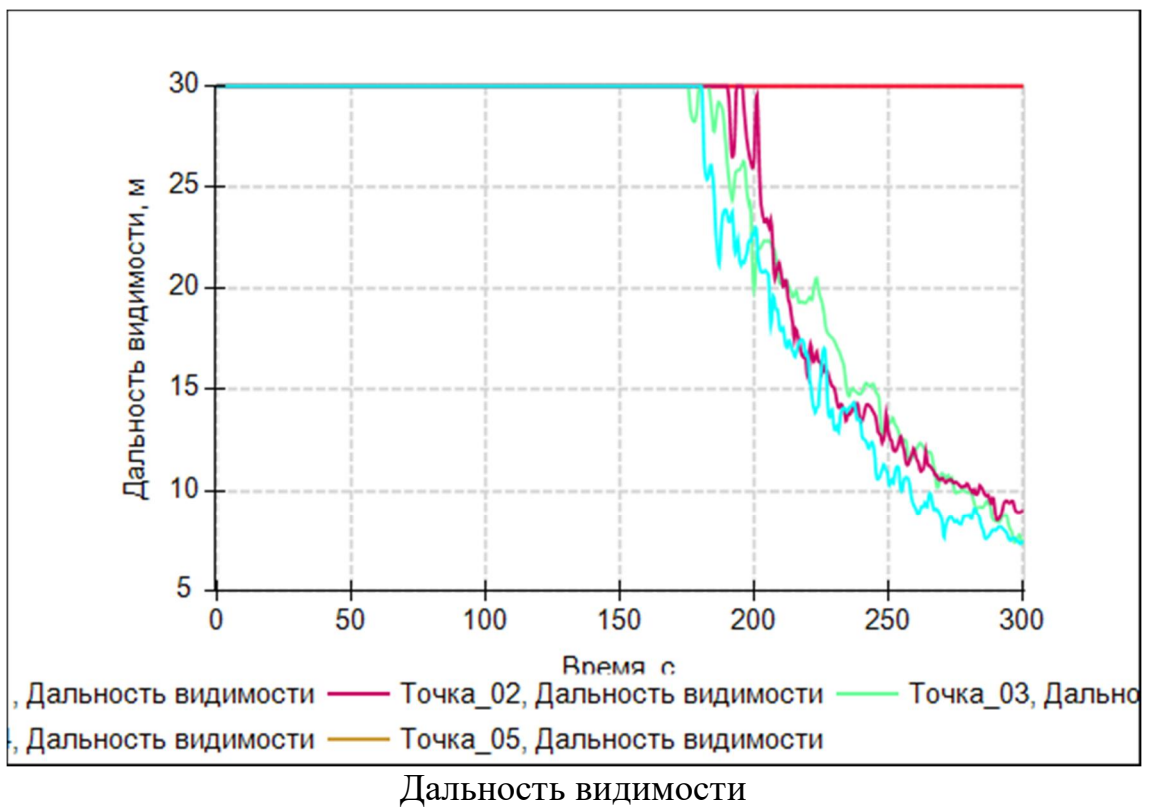
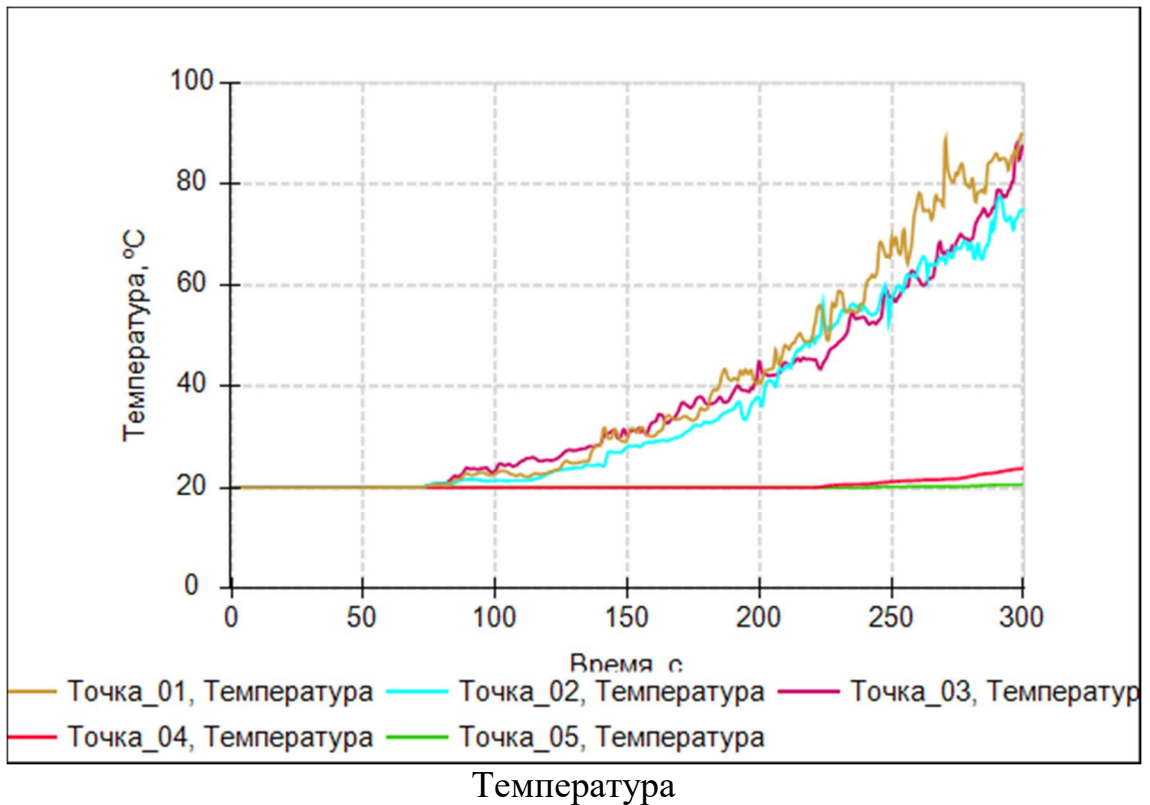
Содержание хлороводорода на момент 300 секунд

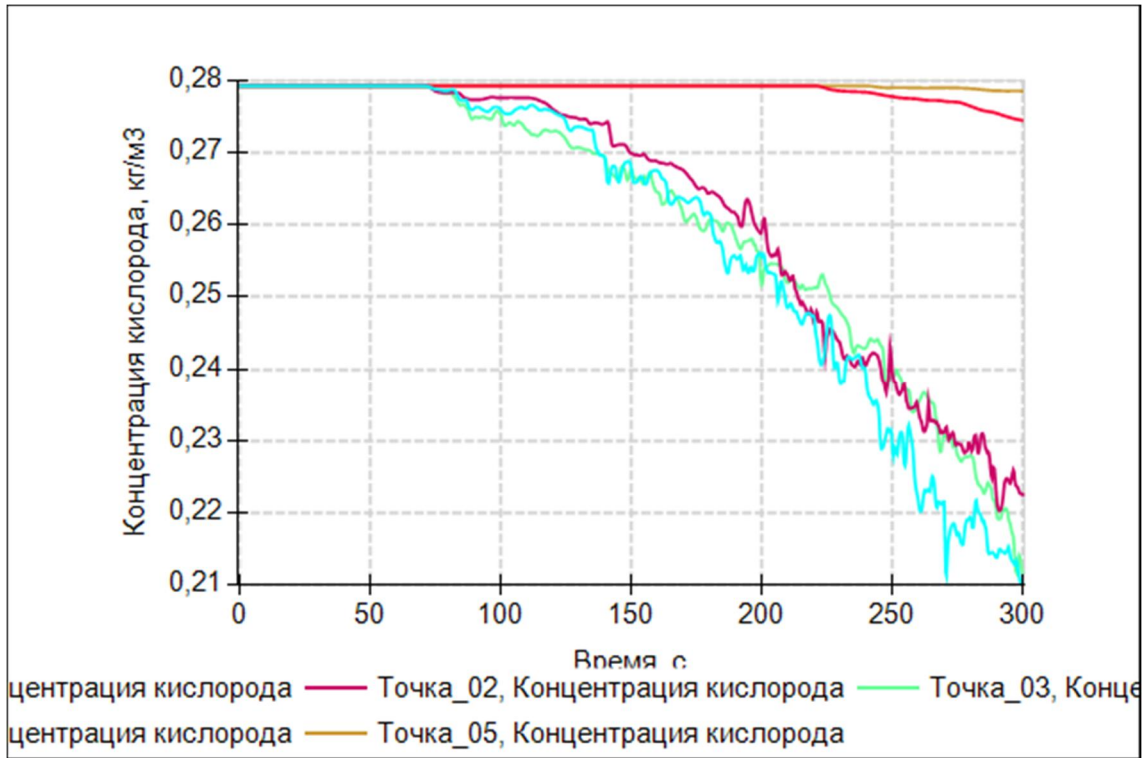
7.1.3. Время блокирования

Расч. точка	T	O2	Видимость	HCl	CO2	CO	Тепловой поток
Точка_01	217,26	225,68	160,81	161,42	>300	>300	>300
Точка_02	190,26	190,26	133,24	144,36	>300	>300	>300
Точка_03	>300	>300	>300	>300	>300	>300	
Точка_04	>300	>300	>300	>300	>300	>300	
Точка_05	>300	>300	>300	>300	>300	>300	
Точка_06	>300	>300	>300	>300	>300	>300	

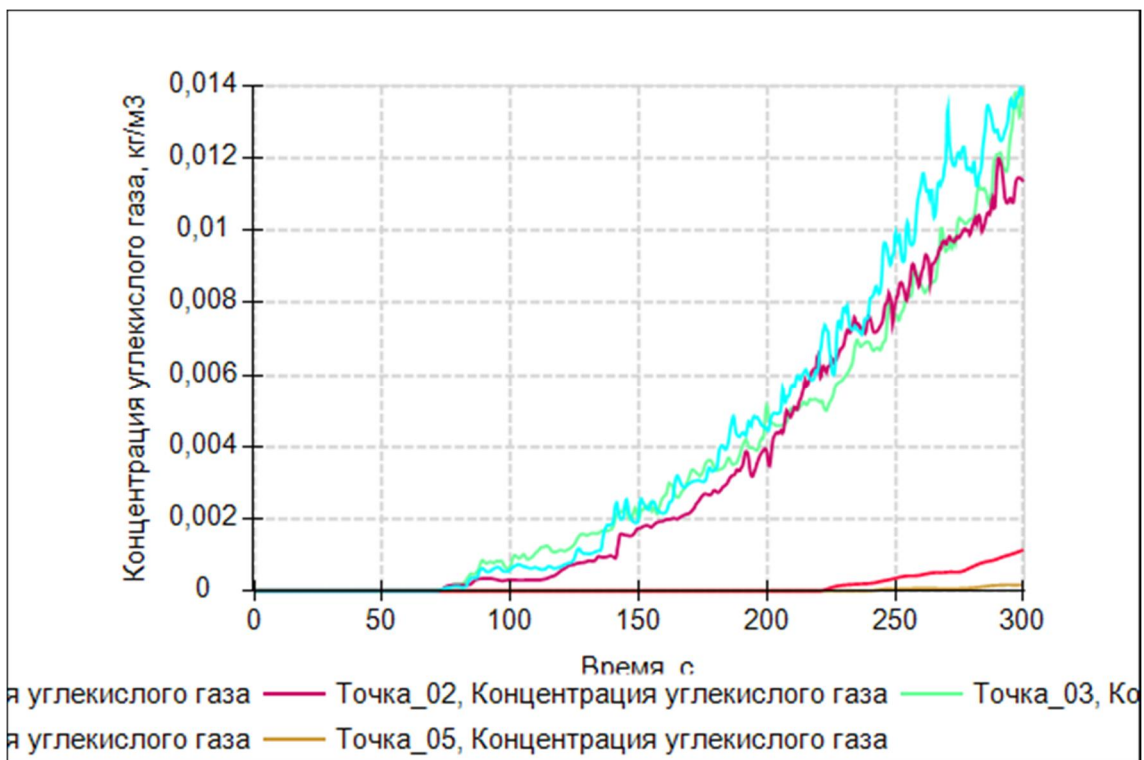
7.2. Сценарий 2

7.2.1. ОФП в расчетных точках

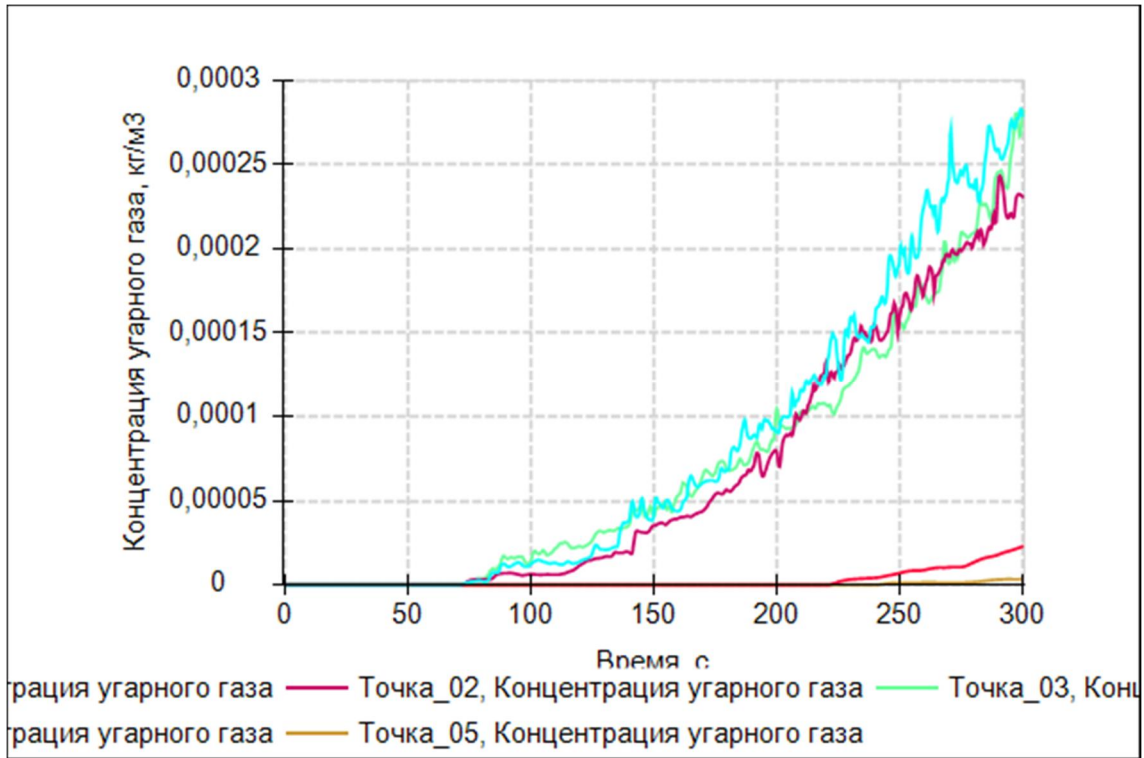




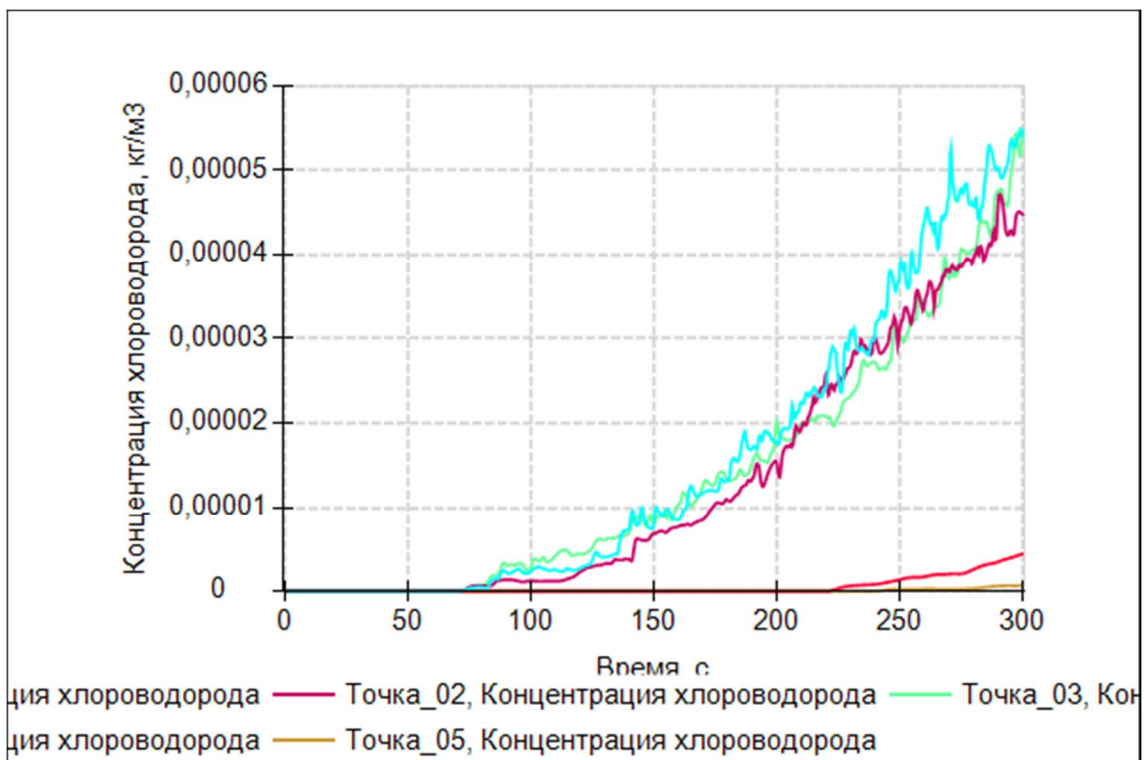
Содержание кислорода



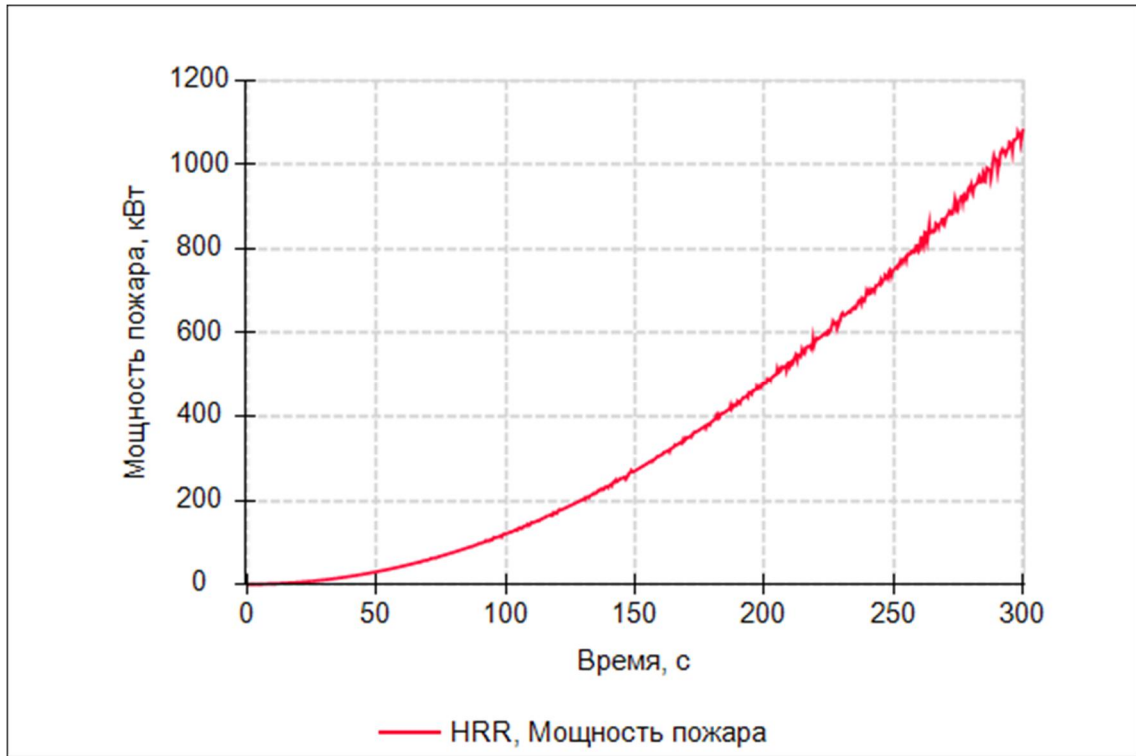
Содержание углекислого газа



Содержание угарного газа



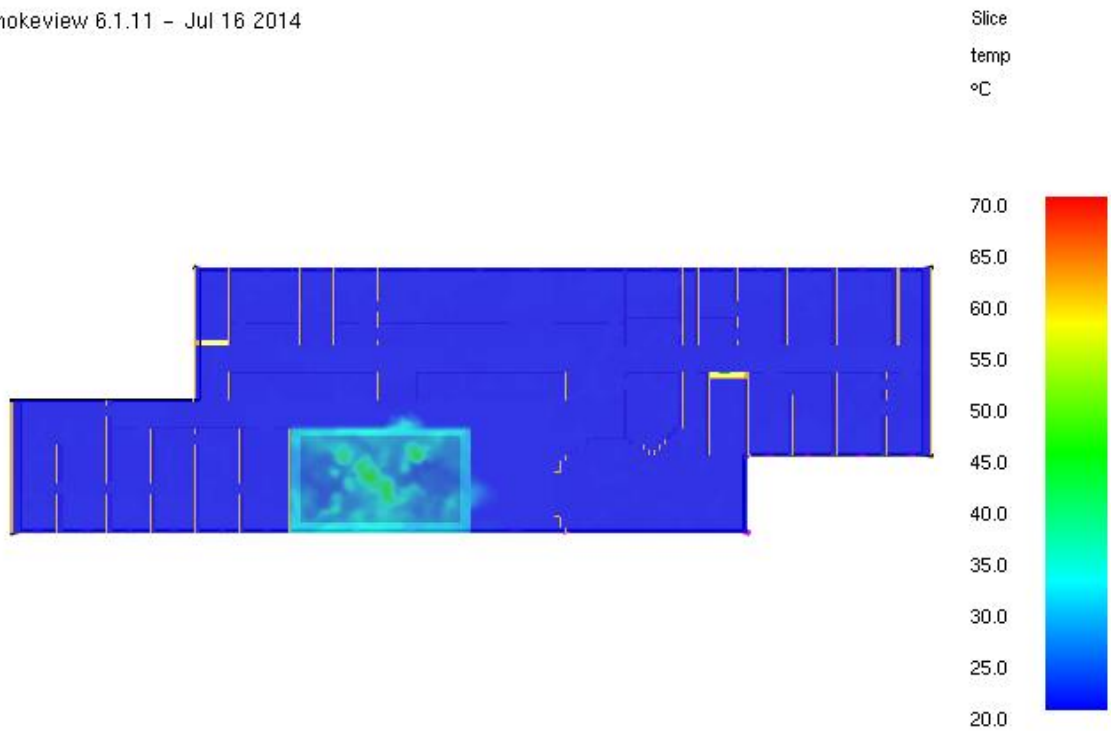
Содержание хлороводорода



Мощность пожара (мощность тепловыделения)

7.2.2. Поля ОФП на уровне 1,7 м

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



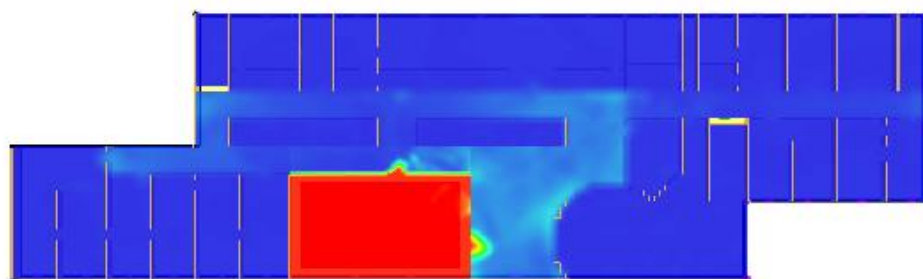
Frame: 499
Time: 149.8



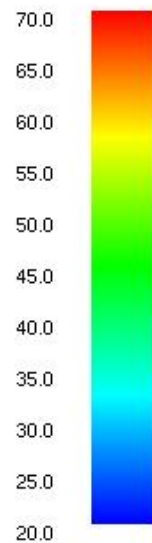
mesh: 2

Температура на момент 150 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
temp
°C



Frame: 999
Time: 299.7



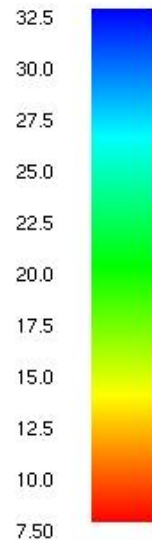
Температура на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
VIS_CO.9H0.1
m



Frame: 499
Time: 149.8

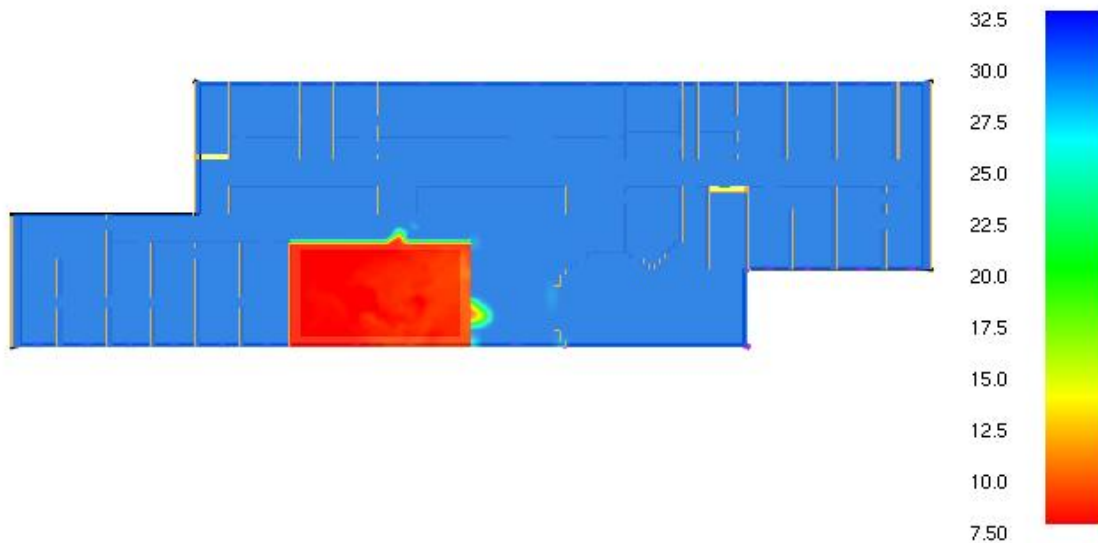


Видимость на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014

Slice
VIS_CO.9H0.1
m



Frame: 999
Time: 299.7

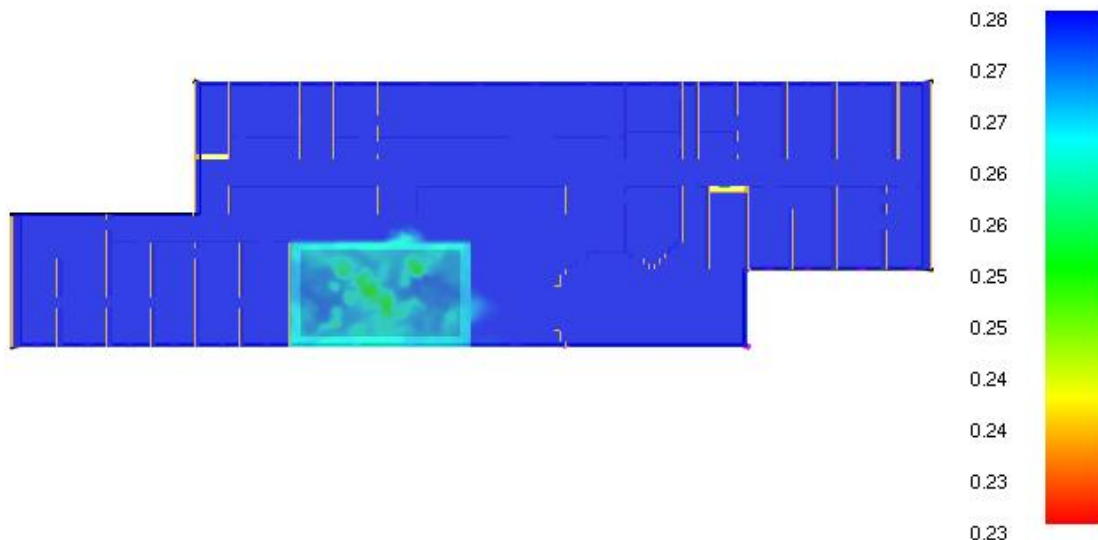


Видимость на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014

Slice
rho_O2
kg/m3



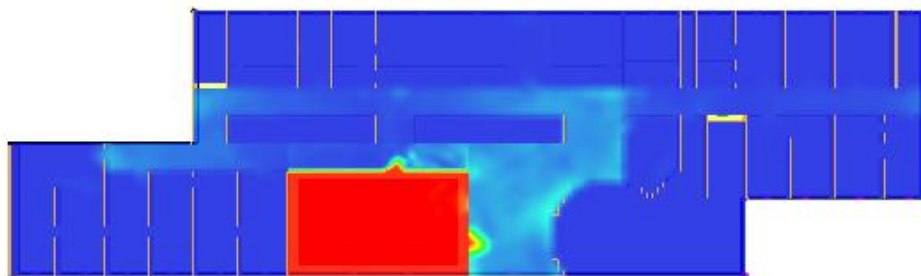
Frame: 499
Time: 149.8



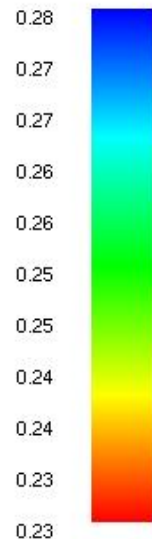
Содержание кислорода на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_O2
kg/m3



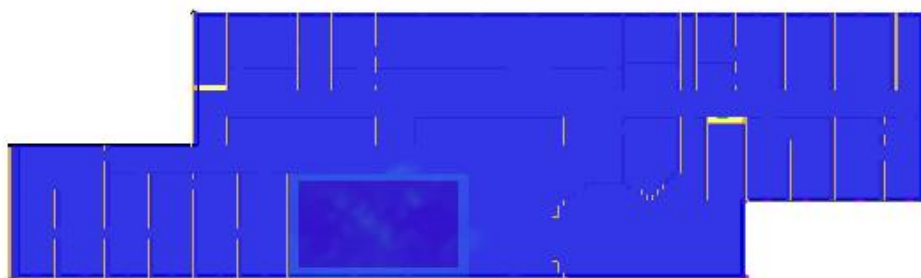
Frame: 999
Time: 299.7



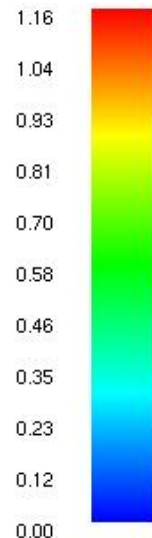
Содержание кислорода на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO
kg/m3
*10^-3



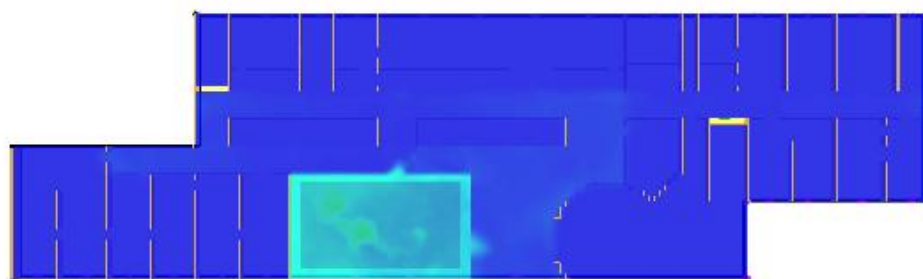
Frame: 499
Time: 149.8



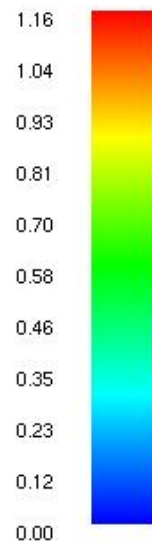
Содержание угарного газа на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO
kg/m3
*10⁻³



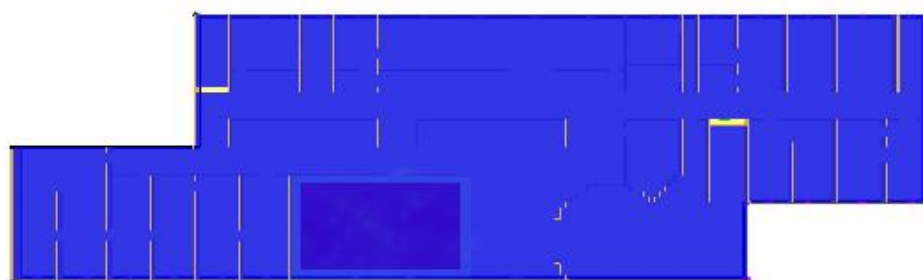
Frame: 999
Time: 299.7



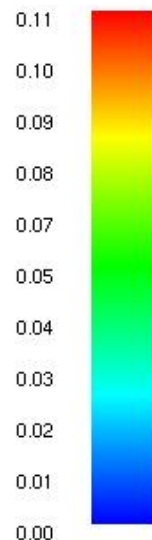
Содержание угарного газа на момент 300 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO2
kg/m3



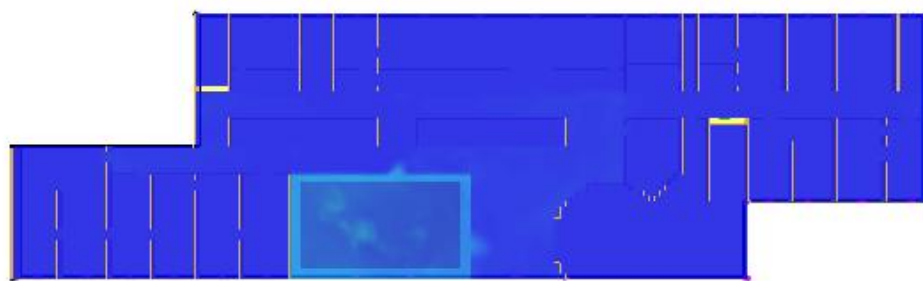
Frame: 499
Time: 149.8



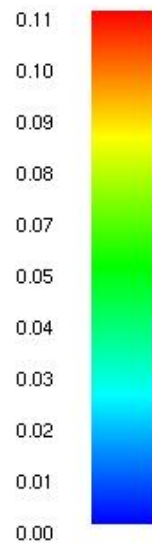
Содержание углекислого газа на момент 150 секунд

mesh: 2

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_CO2
kg/m3



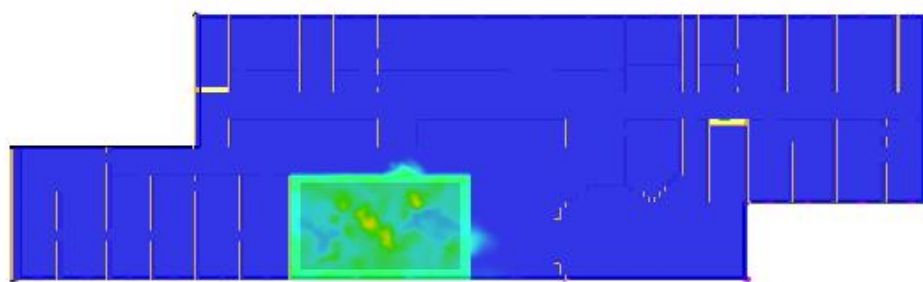
Frame: 999
Time: 299.7



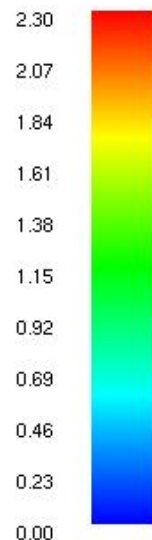
mesh: 2

Содержание углекислого газа на момент 300 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Slice
rho_HCl
kg/m3
*10^-5



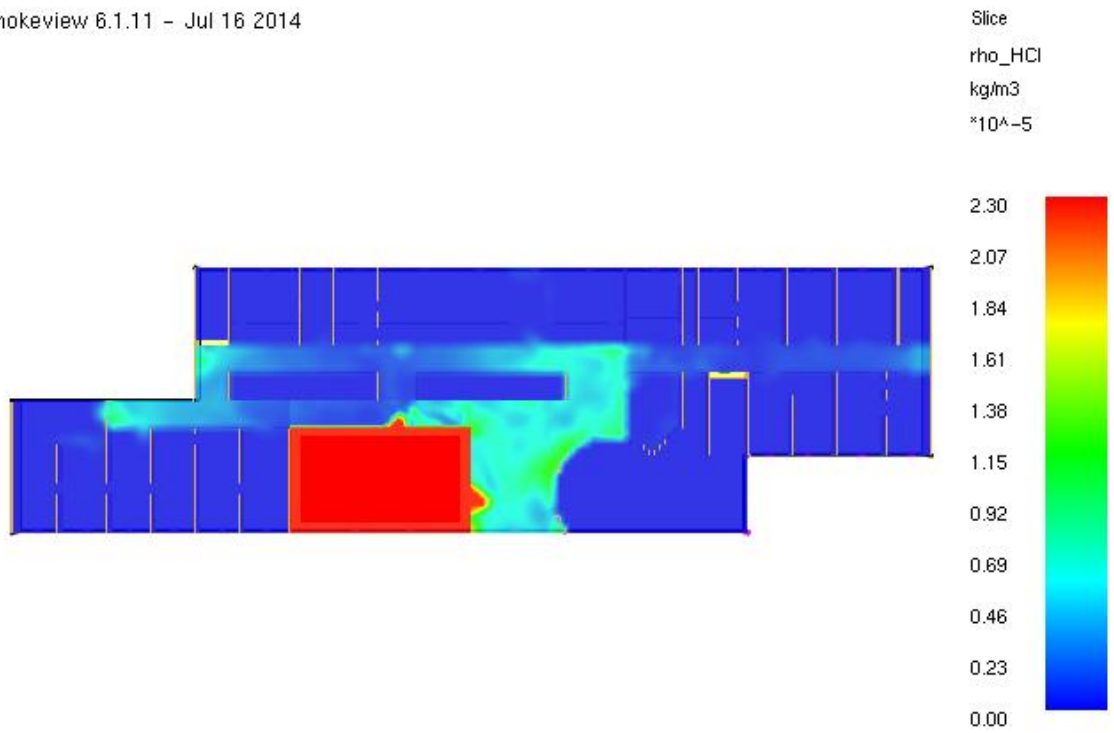
Frame: 499
Time: 149.8



mesh: 2

Содержание хлороводорода на момент 150 секунд

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



Frame: 999

Time: 299.7

mesh: 2

Содержание хлороводорода на момент 300 секунд

7.2.3. Время блокирования

Расч. точка	T	O2	Видимость	HCl	CO2	CO	Тепловой поток
Точка_01	254,47	258,33	205,53	211,55	>300	>300	>300
Точка_02	287,44	287,72	212,47	214,88	>300	>300	>300
Точка_03	276,03	281,75	199,89	229,52	>300	>300	>300
Точка_04	>300	>300	>300	>300	>300	>300	
Точка_05	>300	>300	>300	>300	>300	>300	

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.