

РАЗДЕЛ 4. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

4.1. Математическая модель

Моделирование динамики пожара выполняется программой FDS (Fire Dynamic Simulation) с использованием графического интерфейса Pyrosim. FDS 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 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 используются лагранжевы частицы.

На сегодняшний день приблизительно половина приложений модели служит для проектирования противопожарных систем 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.

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:

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

Закон сохранения энергии:

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

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

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

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

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

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

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). Коэффициенты поглощения сажей и дымом вычислены с помощью узкополосной модели RADCAL.

Подробнее с математической моделью FDS можно ознакомиться в техническом руководстве [Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 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» [Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3].

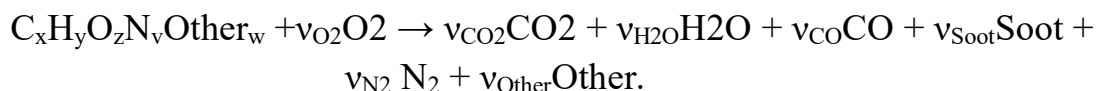
Основные этапы проведения исследований с использованием программы FDS:

- 1) разработка компьютерной топологии исследуемой модели;
- 2) внесение в модель теплотехнических свойств (толщина, плотность, теплоемкость, теплопроводность) исследуемых элементов строительных конструкций;
- 3) разработка расчетного сценария развития пожара (модель горючей нагрузки, место очага пожара, расположение и состояние проемов, работа вентиляции, начальная температура, ветер);
- 4) задание расчетной области (областей) и ее детализации, верификация модели;
- 5) подготовка исходных файлов, настройка серверной и клиентских частей программного обеспечения, запуск параллельного расчета на сетевом кластере, мониторинг процесса расчета;
- 6) сбор и обработка полученных расчетных данных, их интерпретация и визуализация, формулирование выводов.

4.2. Горючая нагрузка, реакция горения

В FDS для моделирования горения может применяться алгоритм решения задачи горения газовой фазы и пиролиза твердой фазы. Первое относится к реакции паров топлива и кислорода, а последнее – к образованию паров топлива с твердой или жидкой поверхности. Реакцию газовой фазы можно представить двумя моделями. Модель по умолчанию, так называемая модель доли в смеси, используется для вычисления выделения паров топлива с его поверхности в ходе процесса горения. Вторая модель – модель конечной скорости горения, в которой все отдельные газы, участвующие в процессе горения задаются и передаются отдельно. В настоящем исследовании принята более распространенная модель доли в смеси.

При использовании модели доли в смеси каждая реакция должна быть представлена в следующем виде:



Необходимо задать химическую формулу топлива, а также удельное выделение CO и сажи, модель FDS использует данную информацию для вычисления объема продуктов горения.

В модели процесс горения задан указанием скорости выделения тепла с единицы площади (HRRPUA) в строке SURF описания поверхности. При этом массовая скорость выгорания и выделение других опасных факторов пожара определяется автоматически пропорционально удельной скорости выгорания материала.

Зависимость скорости выгорания Ψ (кг/с) от времени для кругового распространения пожара определяется формулами:

$$\Psi = \begin{cases} \psi_{уд} \cdot \pi \cdot v^2 \cdot t^2 & \text{при } t \leq t_{\max} \\ \psi_{уд} \cdot \pi \cdot v^2 \cdot t_{\max}^2 & \text{при } t > t_{\max} \end{cases},$$

где $\Psi_{уд}$ – удельная скорость выгорания, кг/(с·м²);

v – линейная скорость распространения пламени, м/с;

t_{\max} – время охвата пожаром всей поверхности горючей нагрузки в помещении, с;

t – текущее время, с.

Время охвата пожаром всей поверхности горючей нагрузки в помещении определяется по формуле (при круговом распространении пожара):

$$t_{max} = \sqrt{\frac{k \cdot F_{\text{пом}}}{\pi \cdot v^2}},$$

где k – коэффициент, учитывающий отличие фактической площади горючей нагрузки в помещении и площади помещения. Для помещений классов функциональной пожарной опасности Ф1-Ф4 принимается равным 2;

$F_{\text{пом}}$ - площадь помещения.

Пожароопасные свойства горючей нагрузки приняты по типовому виду помещения «Административные помещения». Согласно указанным свойствам в FDS введен следующий код.

Код FDS реакции горения

```
&SPEC ID='CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='HYDROGEN CHLORIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='SOOT', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='MY_FUEL_69', MW=87.15015/
&SPEC ID='MY_AIR', BACKGROUND=.TRUE.,
  SPEC_ID(1)='OXYGEN',
  SPEC_ID(2)='NITROGEN',
  VOLUME_FRACTION(1)=1.0,
  VOLUME_FRACTION(2)=3.7619/
&SPEC ID='MY_PRODUCTS_69',
  SPEC_ID(1)='NITROGEN',
  SPEC_ID(2)='SOOT',
  SPEC_ID(3)='CARBON DIOXIDE',
  SPEC_ID(4)='CARBON MONOXIDE',
  SPEC_ID(5)='HYDROGEN CHLORIDE',
  SPEC_ID(6)='WATER VAPOR',
  VOLUME_FRACTION(1)=14.02128,
  VOLUME_FRACTION(2)=0.0438,
  VOLUME_FRACTION(3)=2.92576,
  VOLUME_FRACTION(4)=0.09331,
  VOLUME_FRACTION(5)=0.01386,
  VOLUME_FRACTION(6)=4.10907/

&REAC ID='Административные помещения, учебные классы школ, ВУЗов, кабинеты
поликлиник',
  FYI='Пособие к методике приказа №382',
  HEAT_OF_COMBUSTION=1.4E+4,
  FUEL='MY_FUEL_69',
```

```
SPEC_ID_NU='MY_AIR', 'MY_FUEL_69', 'MY_PRODUCTS_69',  
NU=-3.72718, -1.0, 1.0,  
REAC_MASS_ERROR=0.01/
```

```
&SURF ID='Административные помещения,  
FYI='Пособие к методике приказа №382. v= 0,0045 м/с',  
COLOR='RED',  
HRRPUA=384.0
```

4.3. Аппаратное обеспечение

Для расчета вышеописанной модели использовался кластер, состоящий из 3 компьютеров со следующими характеристиками каждый: процессор – 8 ядер (2.2 ГГц); оперативная память 8 Гб. Скорость сети 1 Гбит/с.

Кластер основан на технологиях Intel MPI и OpenMP. MPI (Message Passing Interface, интерфейс передачи сообщений) является наиболее распространённым стандартом интерфейса обмена данными в параллельном программировании. OpenMP (Open Multi-Processing) реализует параллельные вычисления в многопроцессорных системах с общей памятью.

При такой конфигурации моделирование горения в течение 15 минут требует около суток машинного времени.

РАЗДЕЛ 5. ВИТРАЖ В-1

5.1. Топология модели

Модель здания выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2023 (рисунок 5.1–5.2).

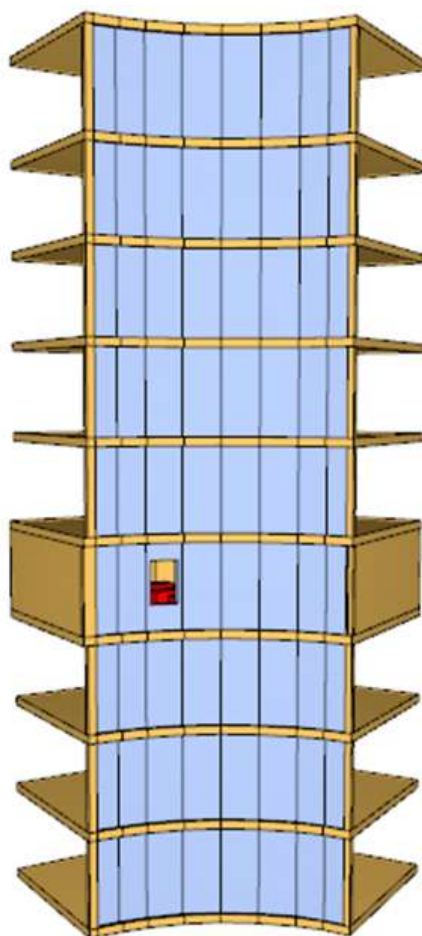


Рисунок 5.1 – Общий вид фасада здания с помещением очага пожара

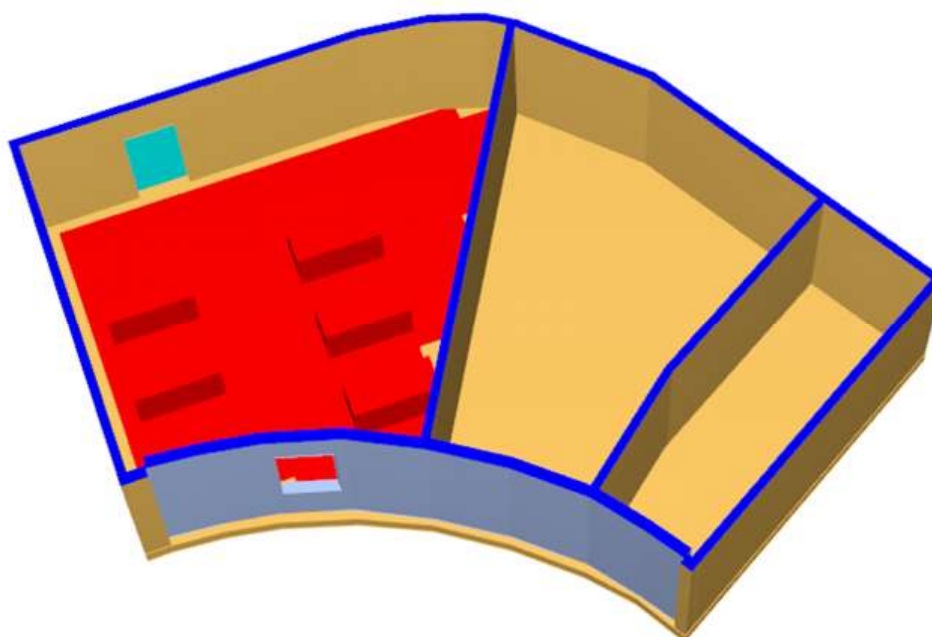


Рисунок 5.2 – Размещение горючей нагрузки в помещении очага пожара

5.2. Величины и плоскости измерения

Для решения задач настоящего исследования необходимо определение полевым методом следующих термогазодинамических параметров пожара:

- изменение температуры воздуха в помещении очага пожара и снаружи здания;
- температура поверхности и интенсивность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа.

Указанные плоскости и зоны измерения представлены на рисунках 5.3–5.5.

Согласно указанным координатам и измеряемым величинам в FDS введен следующий код.

Код FDS

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Сечение', PBX=7.339699/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='Сечение01', PBX=7.339699/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='Сечение01', PBZ=11.4/  
  
&DEVC ID='Падающий тепловой поток 1_MAX', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=7.212555,7.639699,0.240347,0.240347,13.2,16.2/  
&DEVC ID='Температура1_MAX', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=7.189699,7.639699,0.240347,0.240347,13.2,16.2/  
&DEVC ID='Температура в-ха_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=7.189699,7.639699,0.240347,0.390347,13.2,16.2/
```

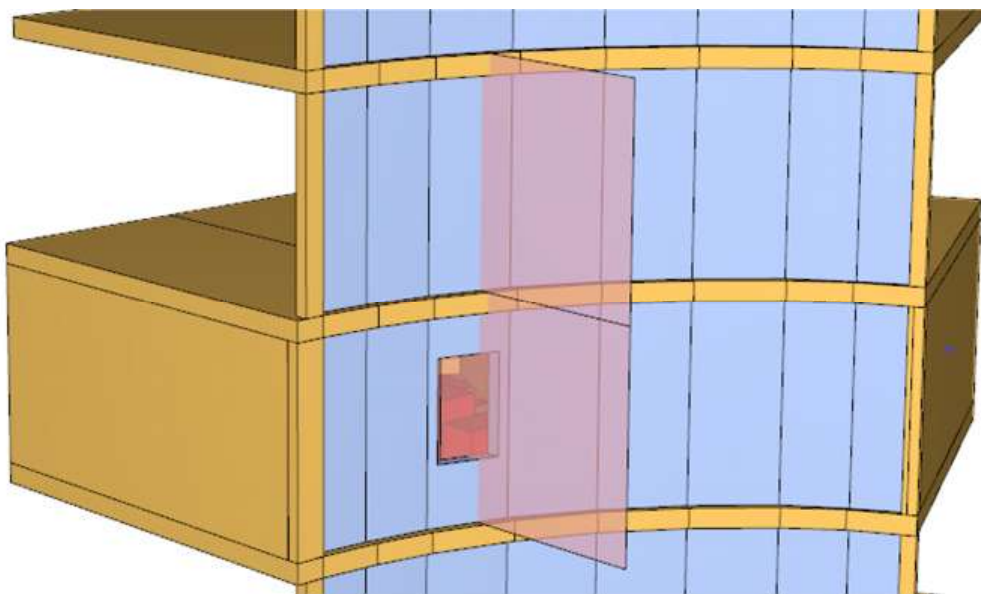


Рисунок 5.3 – Плоскость измерения температуры воздуха, направления и скорости ветра

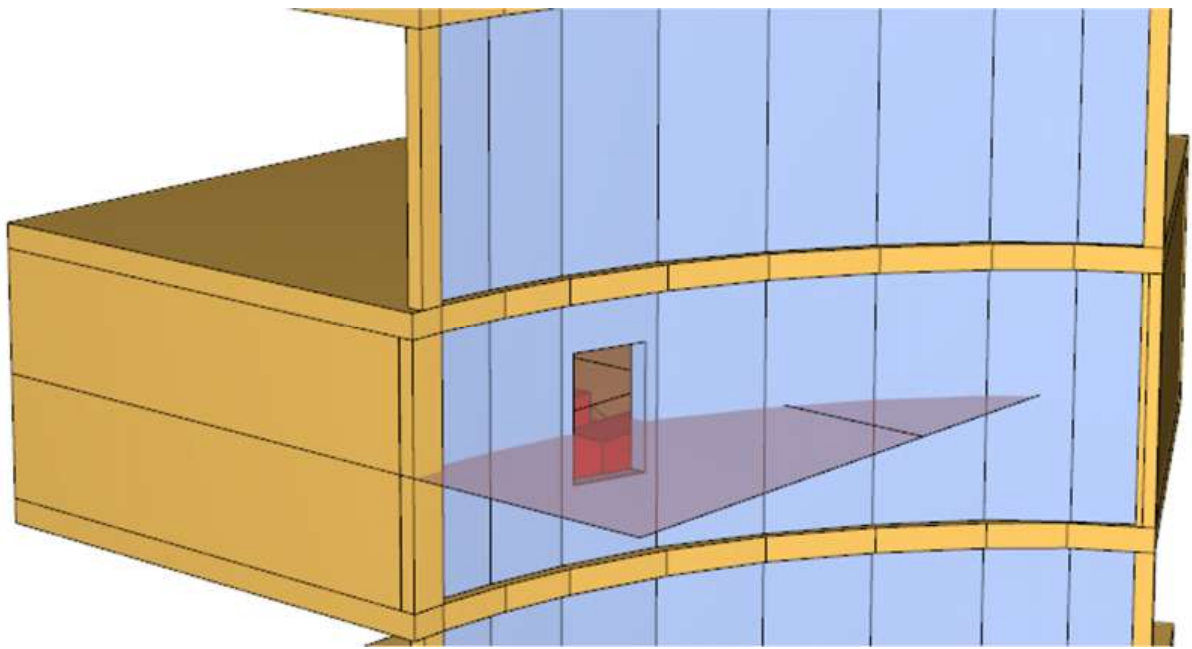


Рисунок 5.4 – Горизонтальная плоскость направления и скорости ветра

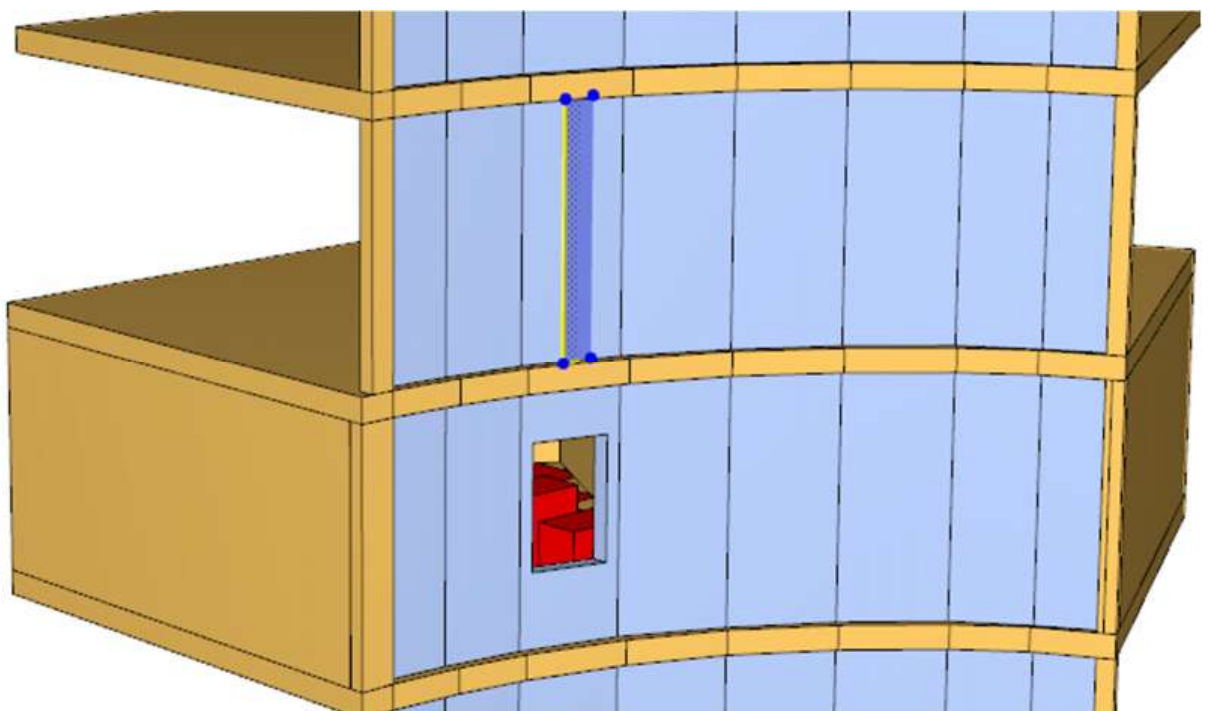


Рисунок 5.5 – Зоны измерения теплового потока и температуры стекла

5.3. Результаты моделирования

Результаты математического моделирования рассматриваемого сценария пожара показывают, что площадь горения, равная удвоенной площади помещения, полностью охватывается пламенем за 1138 с, при этом температура в нагретом слое достигает 300 °С и приводит к вскрытию остекления помещения очага пожара через 455 с от начала горения (рисунок 5.6).

Мощность тепловыделения пожара достигает 9 МВт (рисунки 5.7–5.9). Скачок графика в момент 455 с соответствует вскрытию остекления и резкому изменению условий газообмена.

Температура газовой среды в помещении очага пожара достигает 600 °С, снаружи здания – до 400 °С (рисунок 5.10, 5.11).

Ветер со скоростью 3,8 м/с направлен перпендикулярно на фасад здания в течение всего времени моделирования (рисунки 5.12, 5.13).

Дым и продукты горения под действием ветра распространяются вплотную к поверхности стены здания (рисунок 5.14).

Максимальный тепловой поток, падающий на поверхность остекления помещения вышележащего этажа не превышает 3 кВт/м² (рисунки 5.15, 5.16).

Температура поверхности стекла помещения вышележащего этажа за время 15 минут не достигает значения 300 °С; максимальная температура составляет 52 °С (рисунки 5.17, 5.18).

Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа составляет 185 °С и также не превышает критическое значение 600 °С (рисунок 5.19).

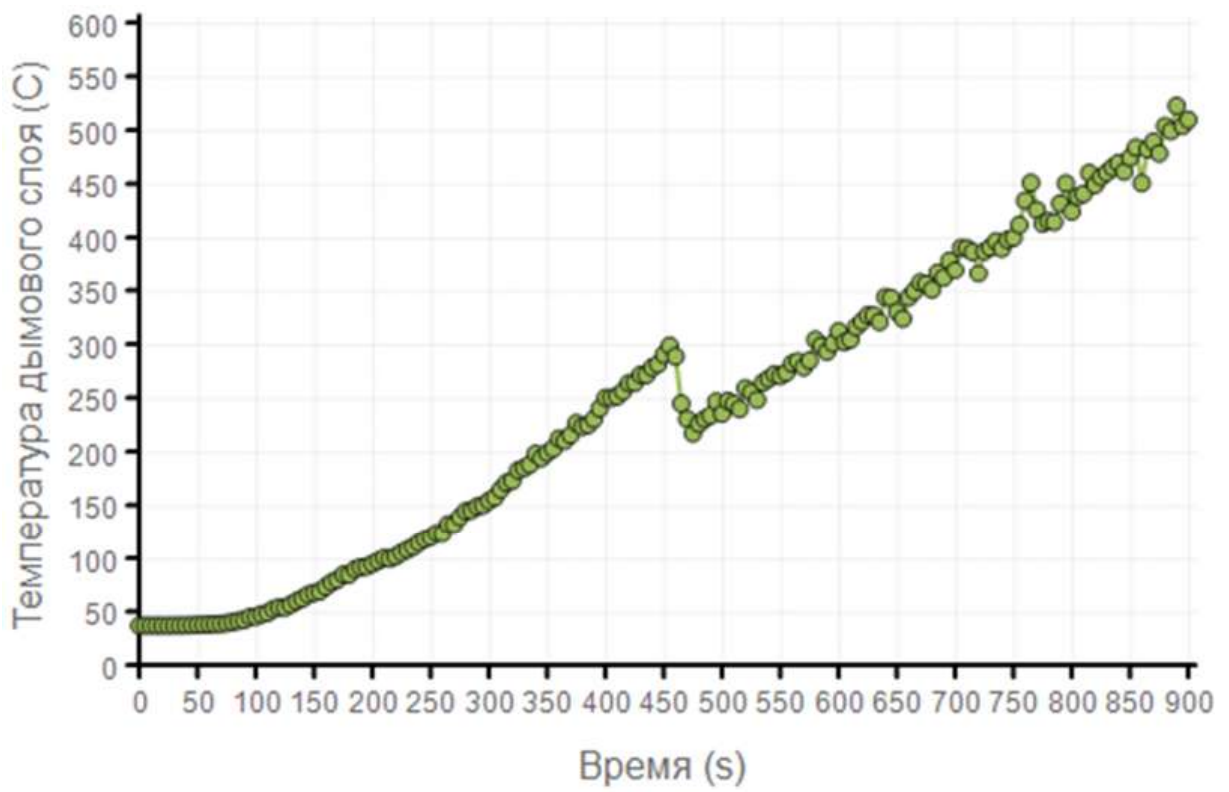


Рисунок 5.6 – Температура дымового слоя в помещении очага пожара

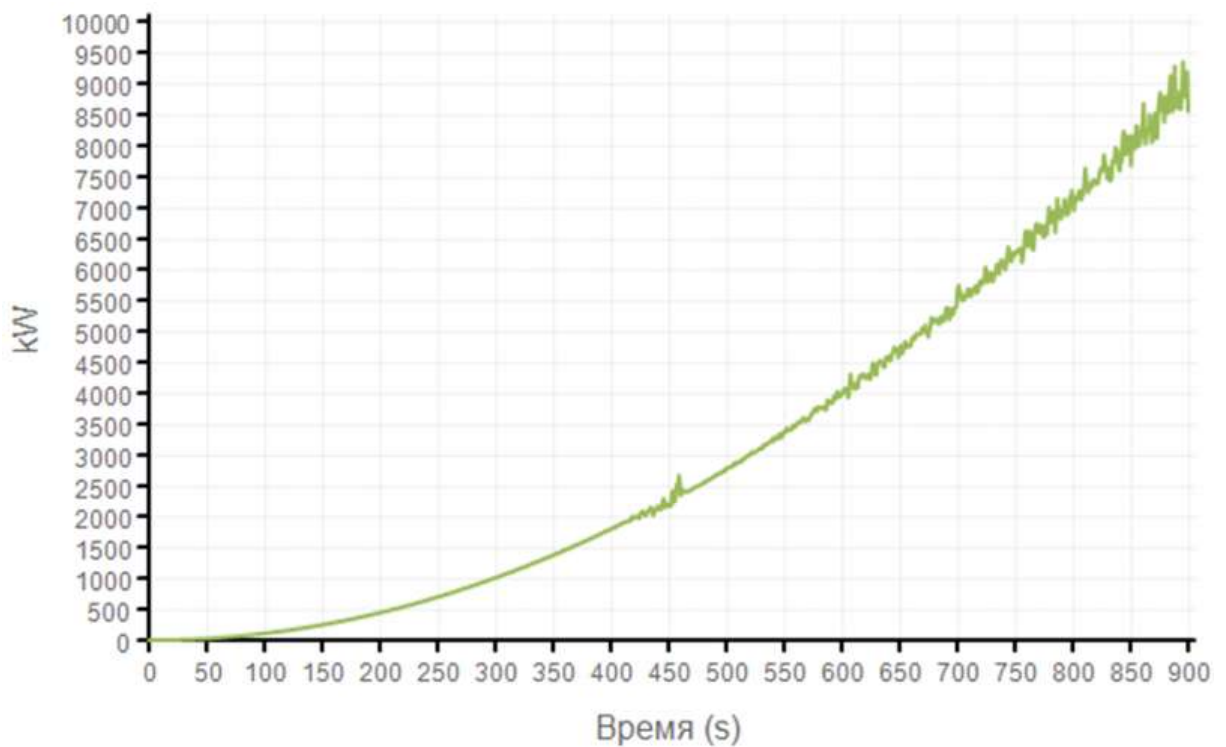


Рисунок 5.7 – Мощность тепловыделения очага пожара

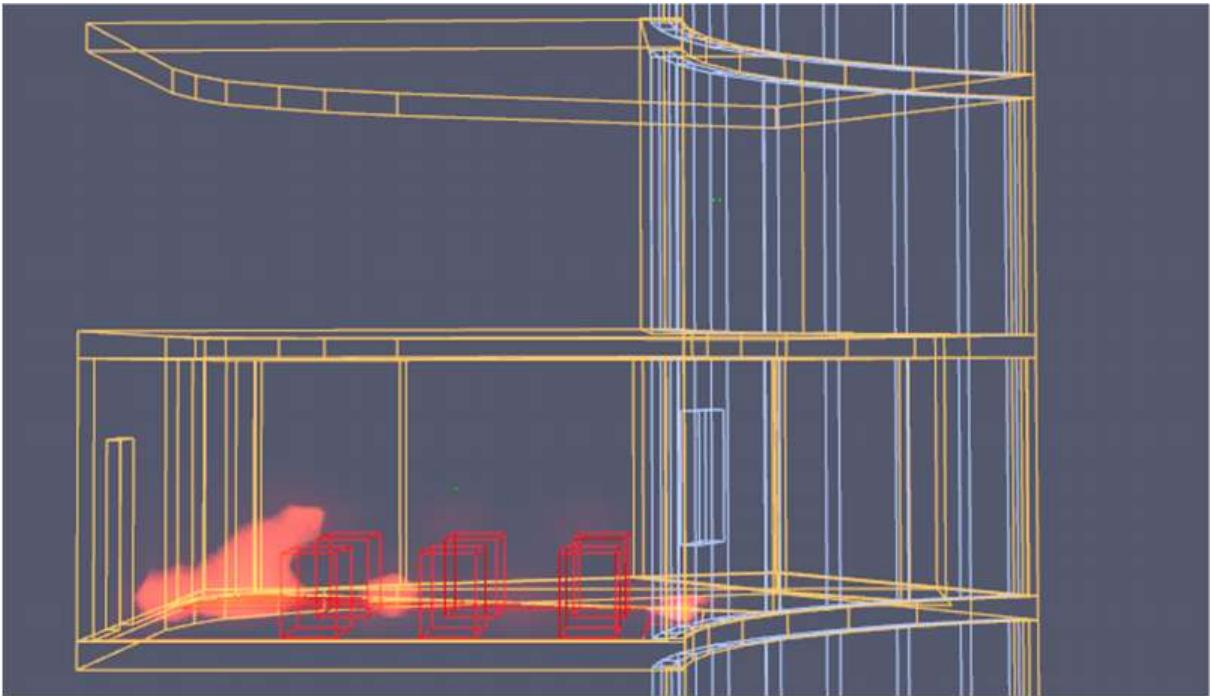


Рисунок 5.8 – Тепловыделение перед вскрытием остекления проема

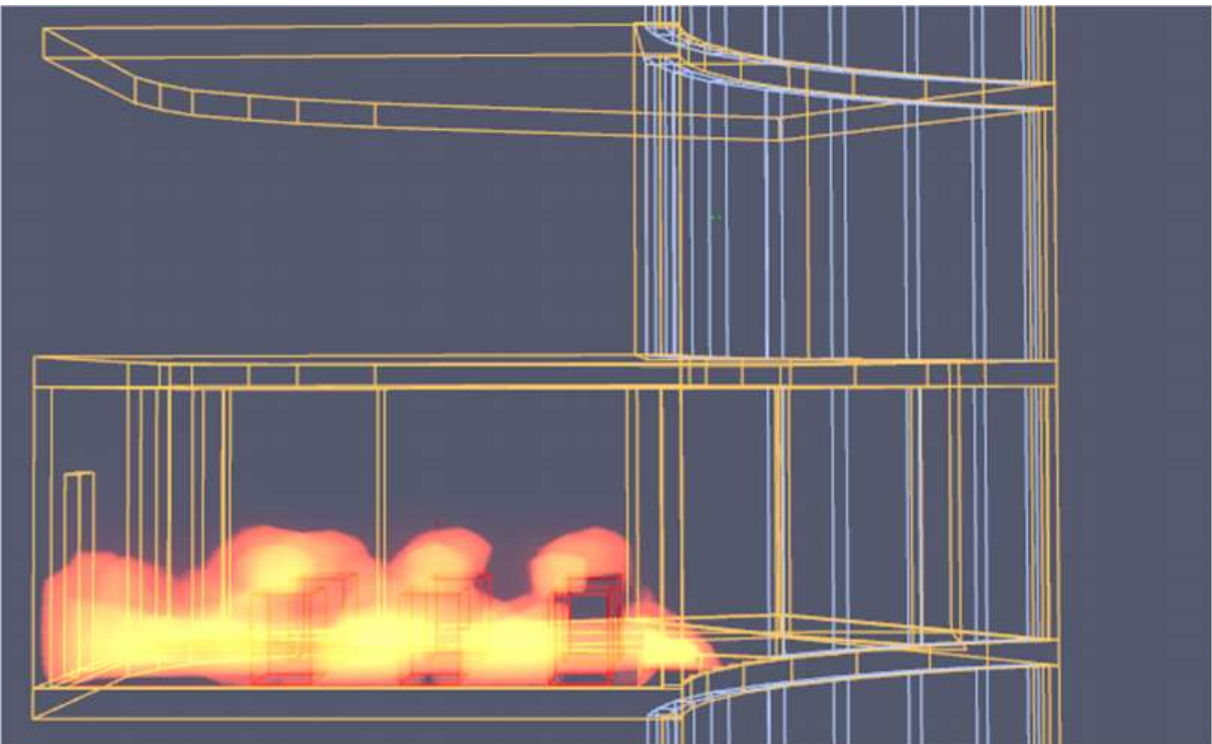


Рисунок 5.9 – Тепловыделение на момент 900 с

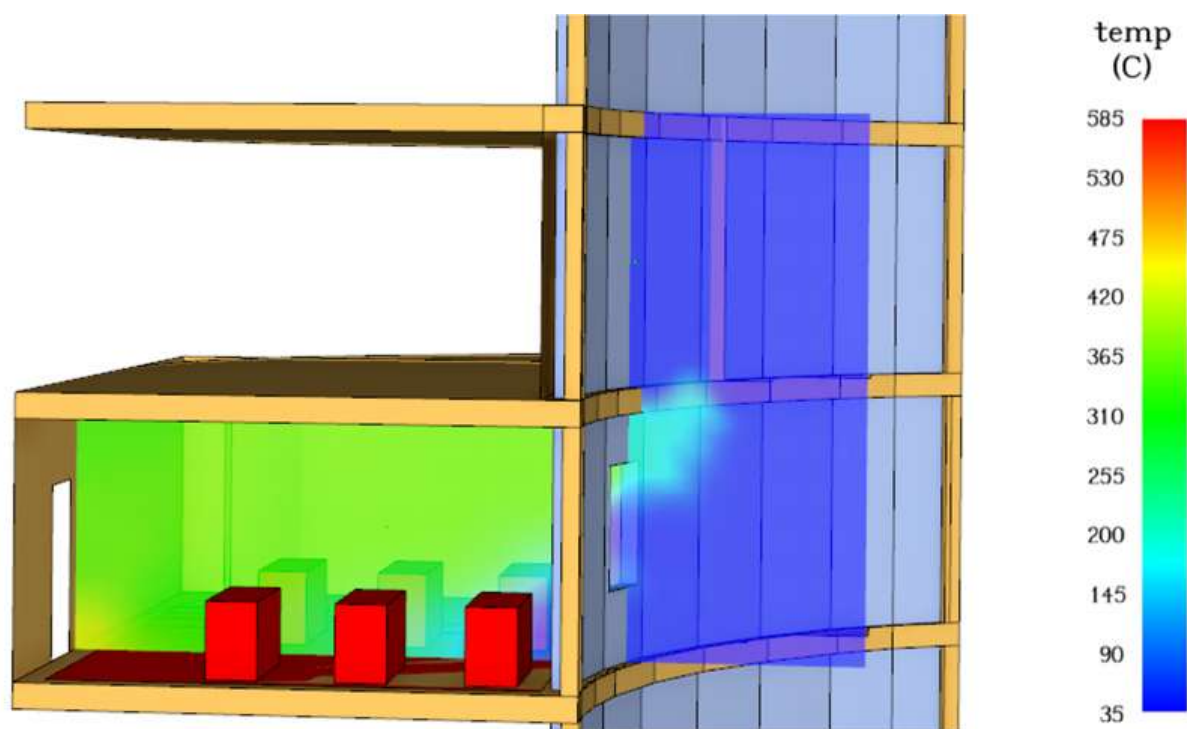


Рисунок 5.10 – Температура воздуха перед вскрытием остекления проема

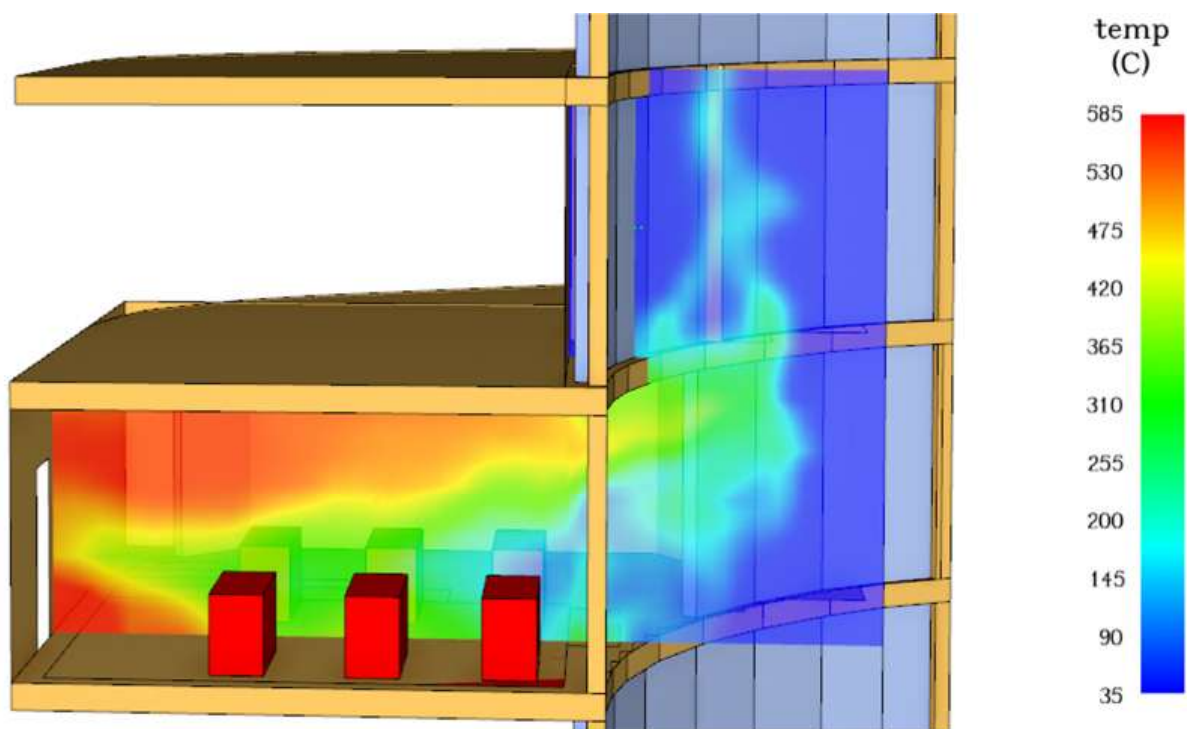


Рисунок 5.11 – Температура воздуха на момент 900 с

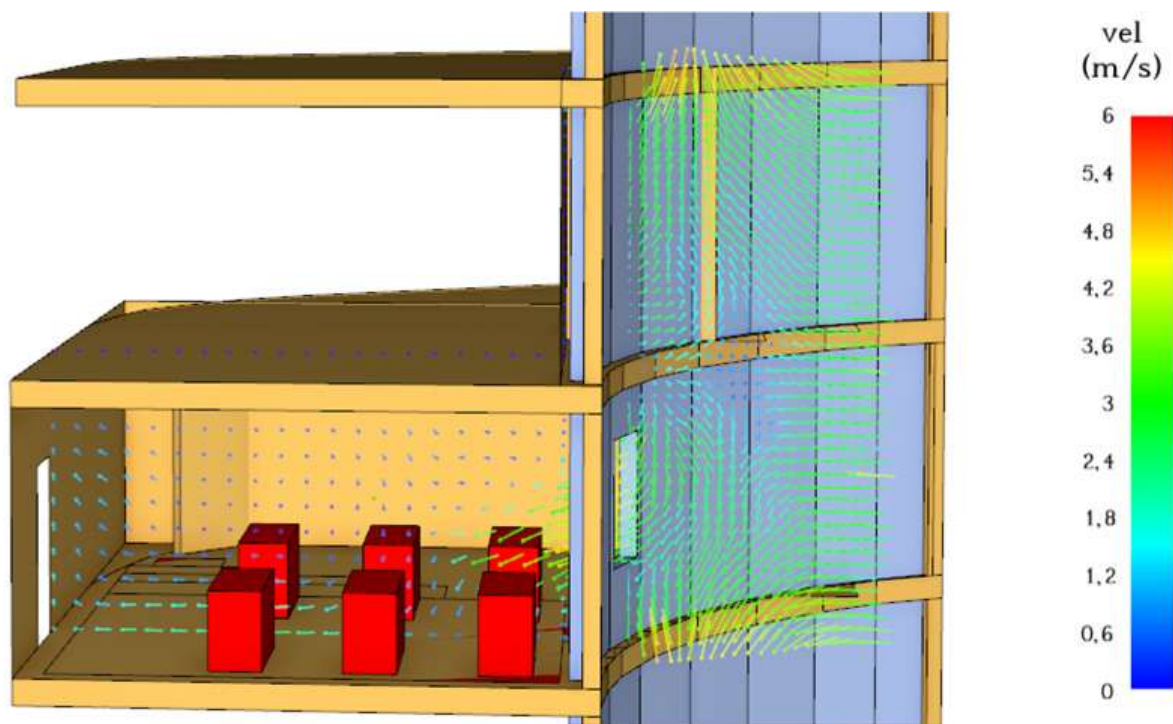


Рисунок 5.12 – Направление и скорость движения воздуха в начальный момент

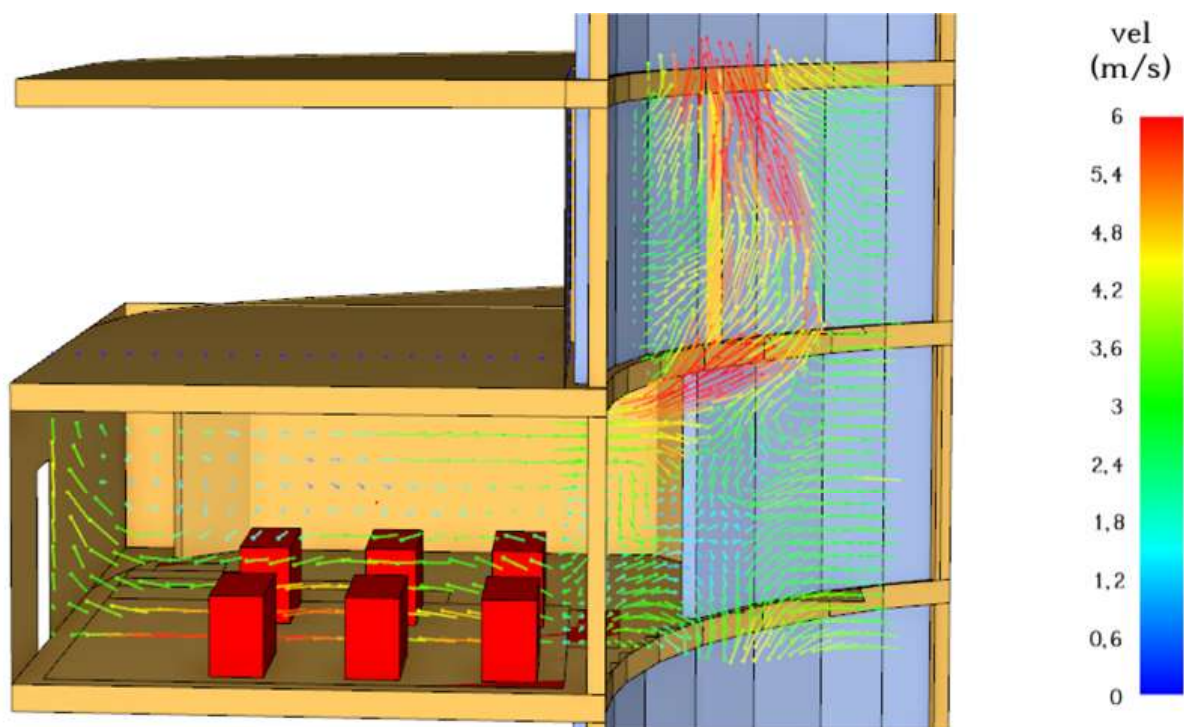


Рисунок 5.13 – Направление и скорость движения воздуха в развитой стадии пожара

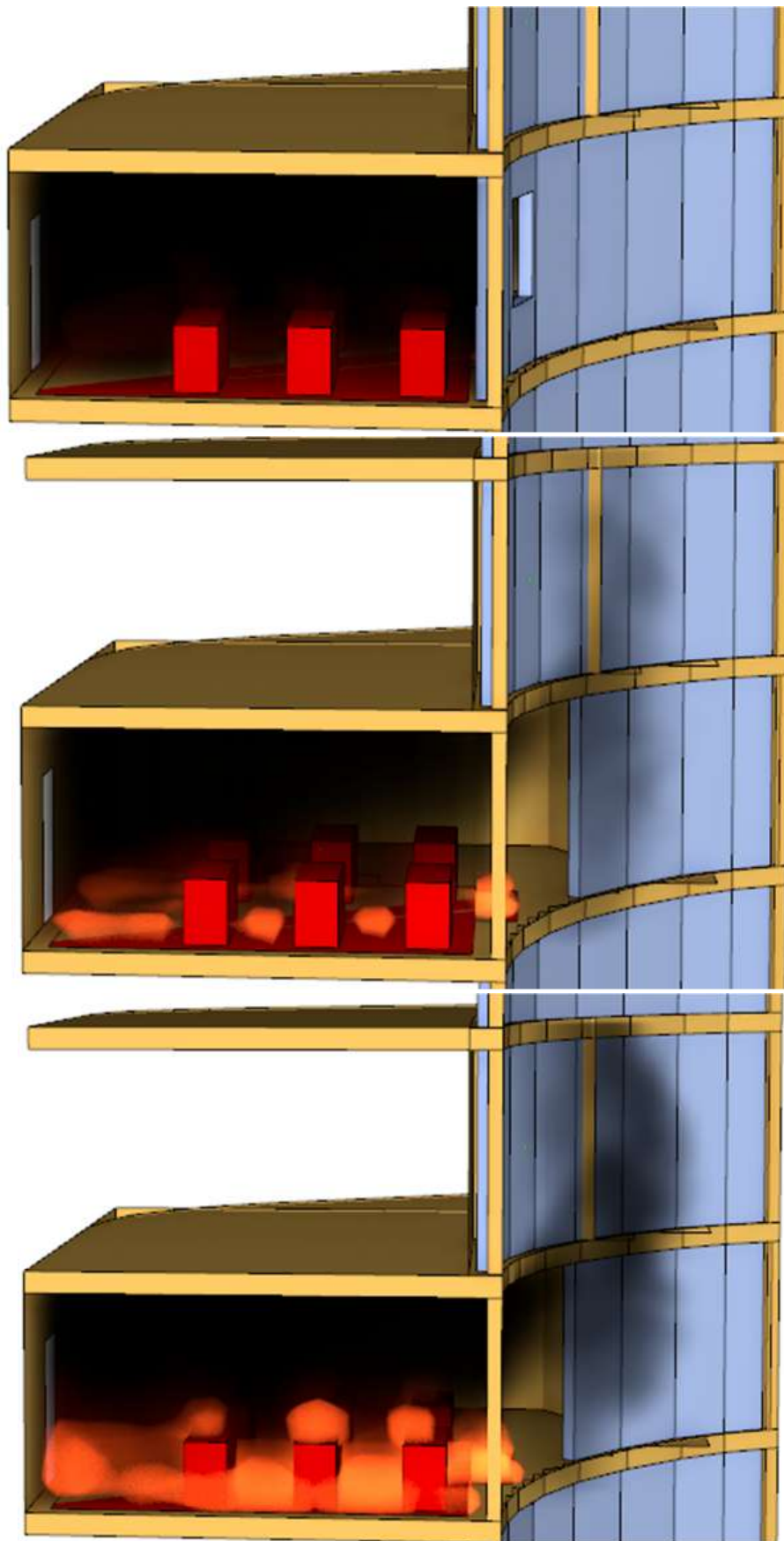


Рисунок 5.14 – Распространение дыма и продуктов горения в различные моменты времени

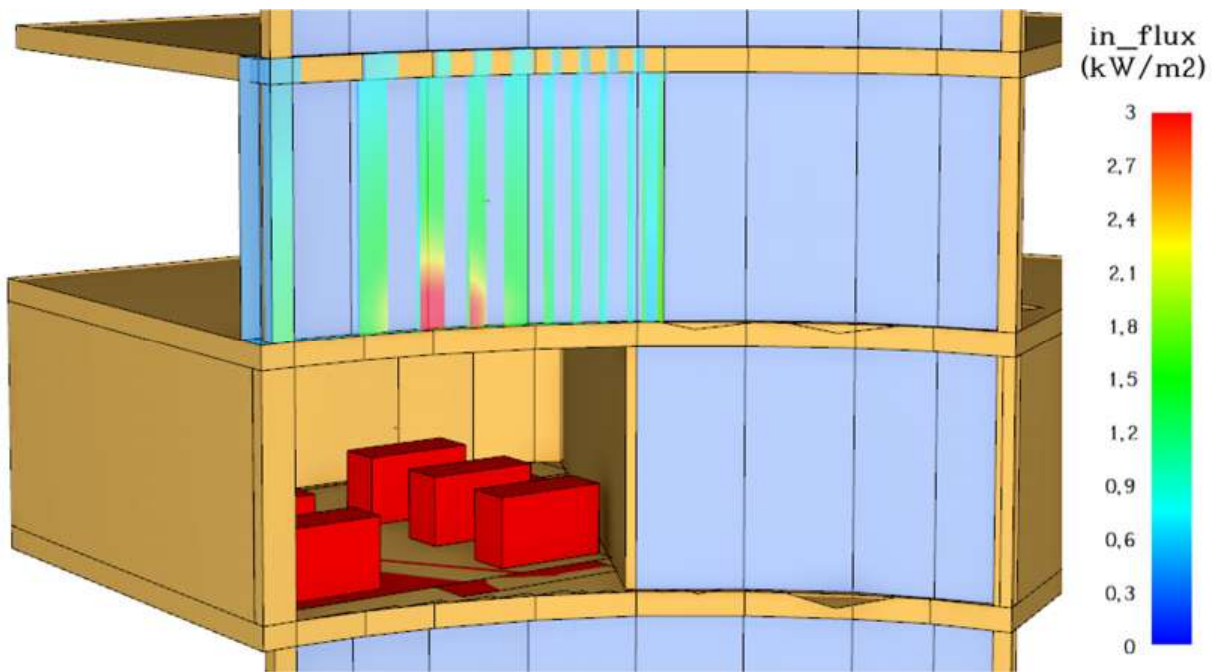


Рисунок 5.15 – Тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

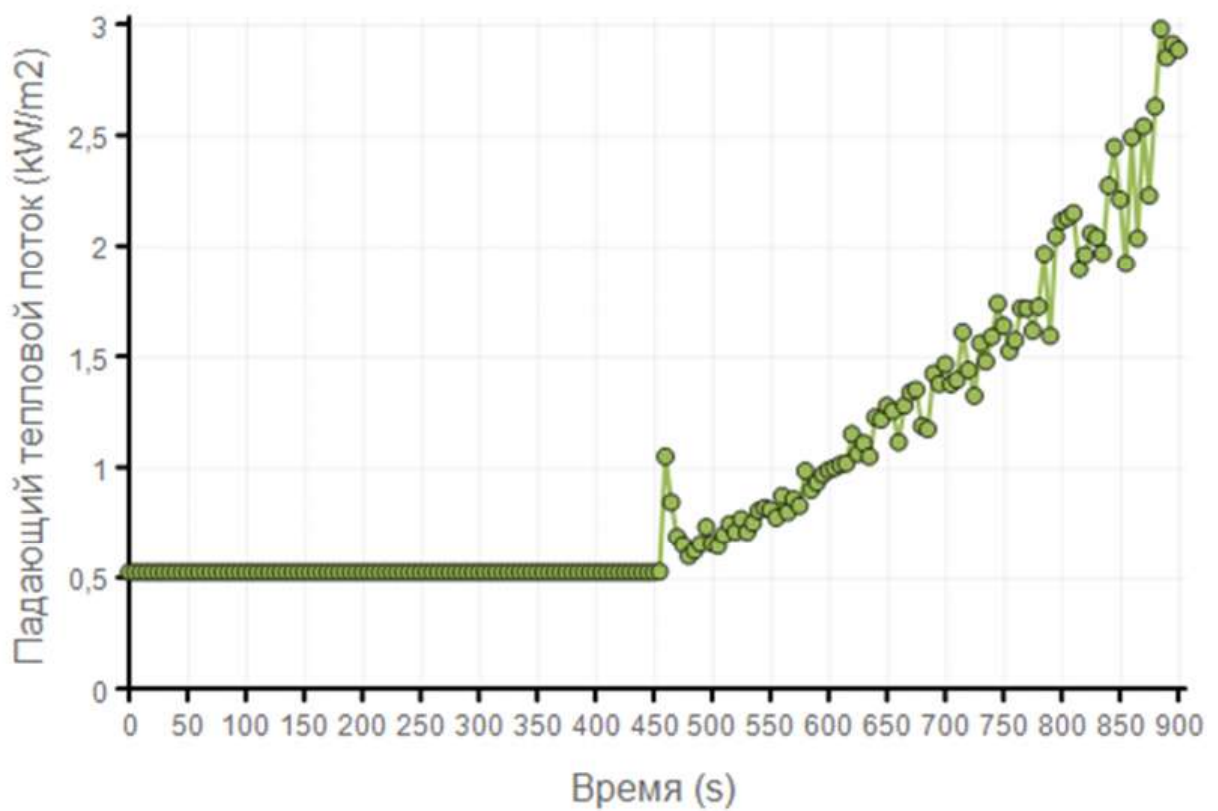


Рисунок 5.16 – Максимальный тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

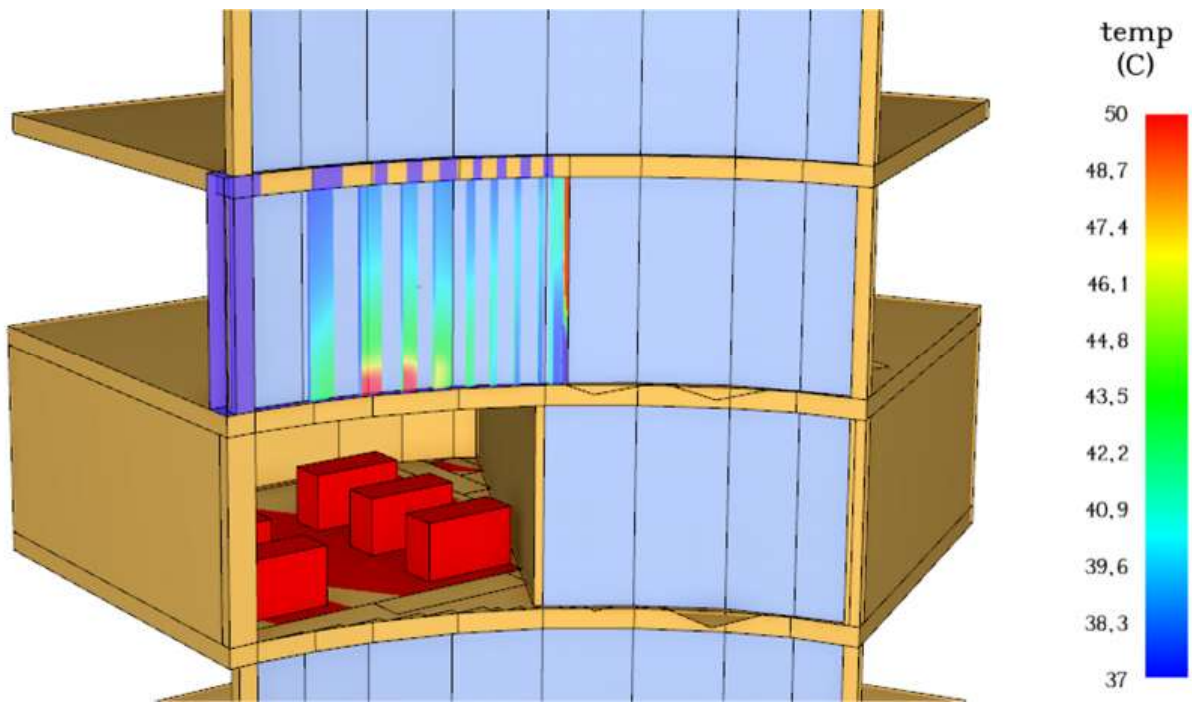


Рисунок 5.17 – Температура поверхности стекла

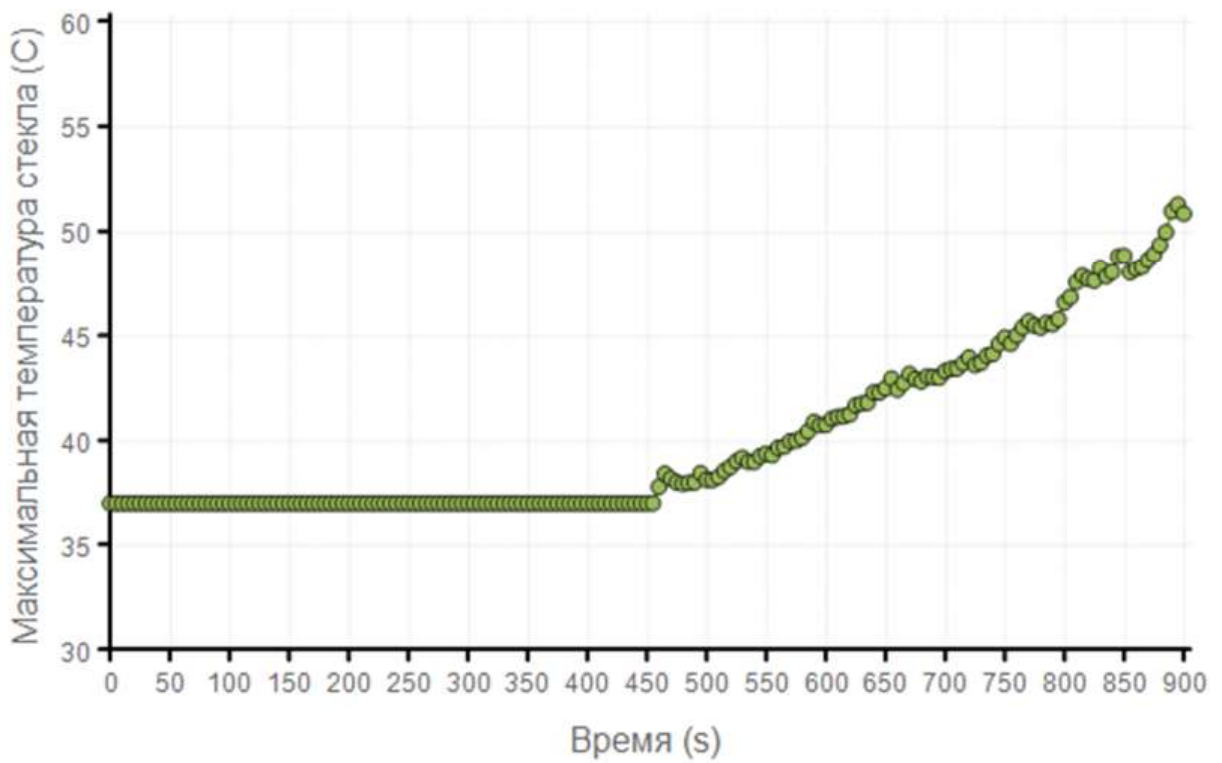


Рисунок 5.18 – Максимальная температура поверхности остекления помещения вышележащего этажа

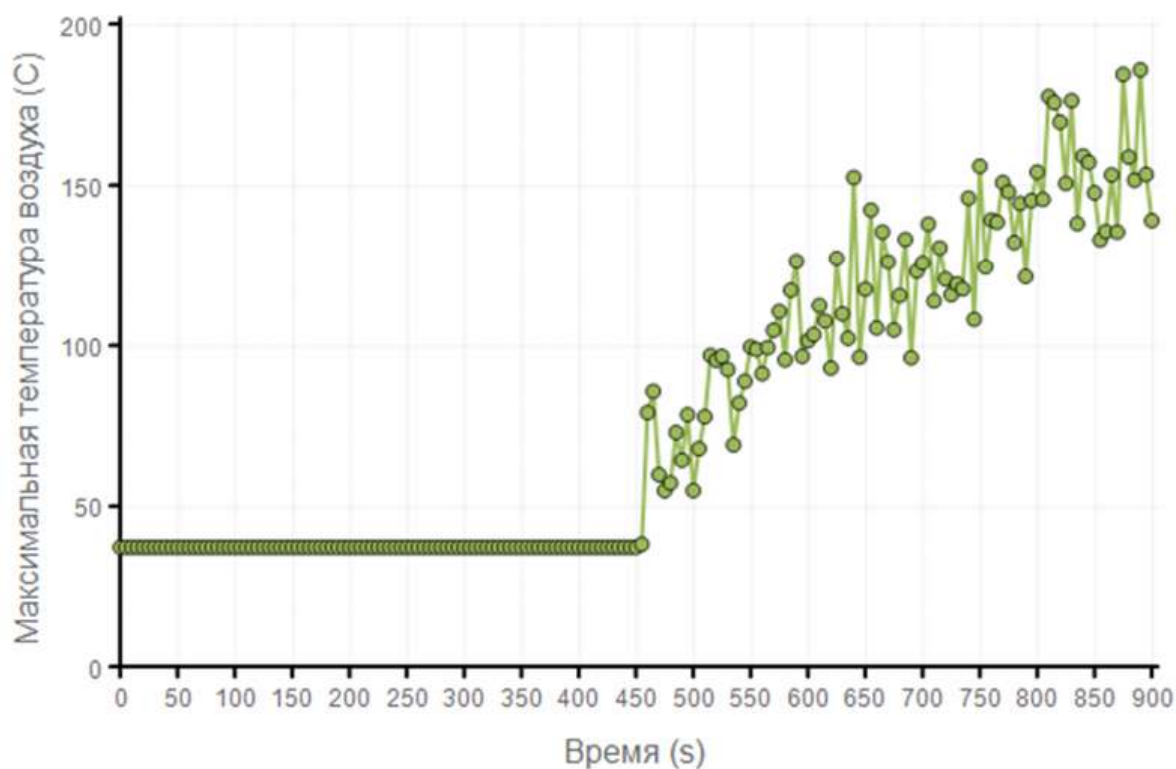


Рисунок 5.19 – Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа

5.4. Вывод

Результаты моделирования позволяют заключить следующее.

Среднеобъемная температура в нагретом слое помещения очага пожара превышает 300 °С, что приводит к вскрытию остекления.

Плотность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа в течение 15 минут не достигает критического значения 25 кВт/м².

Максимальная температура стекла не превышает критическое значение 300 °С, а максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла не превышает критическое значение 600 °С в течение 15 минут.

РАЗДЕЛ 6. ВИТРАЖ В-5

6.1. Топология модели

Модель здания выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2023 (рисунок 6.1–6.2).

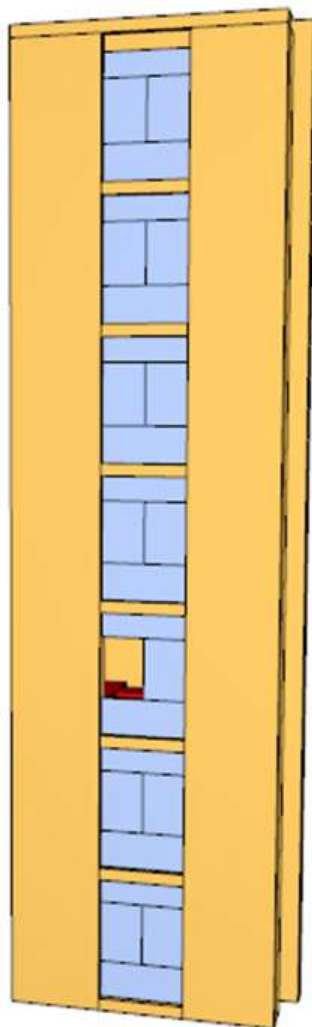


Рисунок 6.1 – Общий вид фасада здания с помещением очага пожара

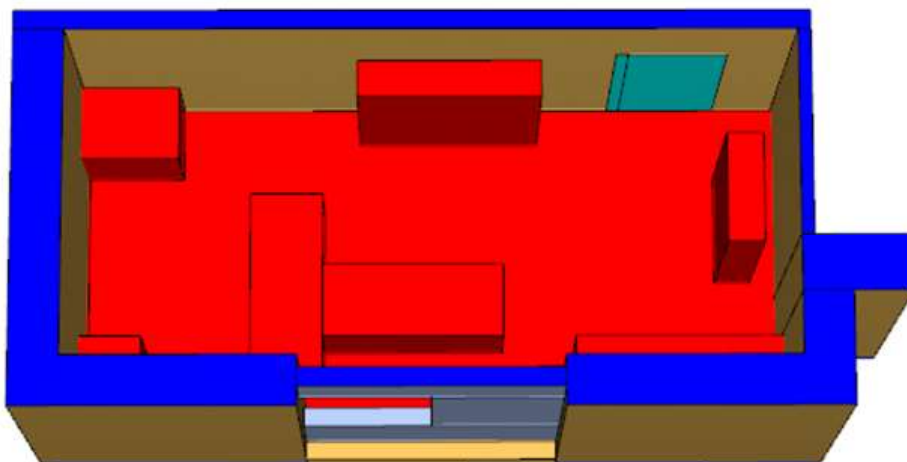


Рисунок 6.2 – Размещение горючей нагрузки в помещении очага пожара

6.2. Величины и плоскости измерения

Для решения задач настоящего исследования необходимо определение полевым методом следующих термогазодинамических параметров пожара:

- изменение температуры воздуха в помещении очага пожара и снаружи здания;
- температура поверхности и интенсивность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа.

Указанные плоскости и зоны измерения представлены на рисунках 6.3–6.5.

Согласно указанным координатам и измеряемым величинам в FDS введен следующий код.

Код FDS

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Сечение', PBX=2.85/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='Сечение01', PBX=2.85/  
&DEVC ID='Падающий тепловой поток 1_MAX', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=2.25,4.35,0.15,0.15,9.9,12.9/  
&DEVC ID='Температура1_MAX', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=2.25,4.35,0.15,0.15,9.9,12.9/  
&DEVC ID='Температура в-ха_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=2.25,4.35,1.776357E-14,0.15,9.9,12.9/
```

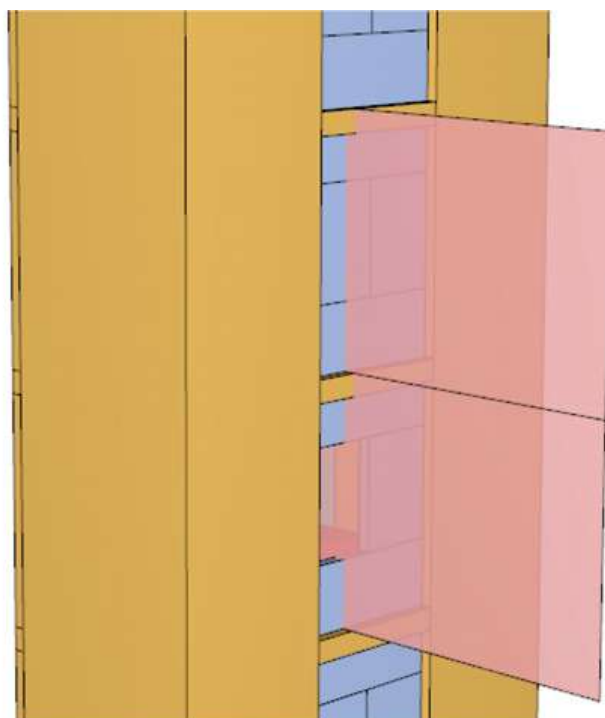


Рисунок 6.3 – Плоскость измерения температуры воздуха, направления и скорости ветра

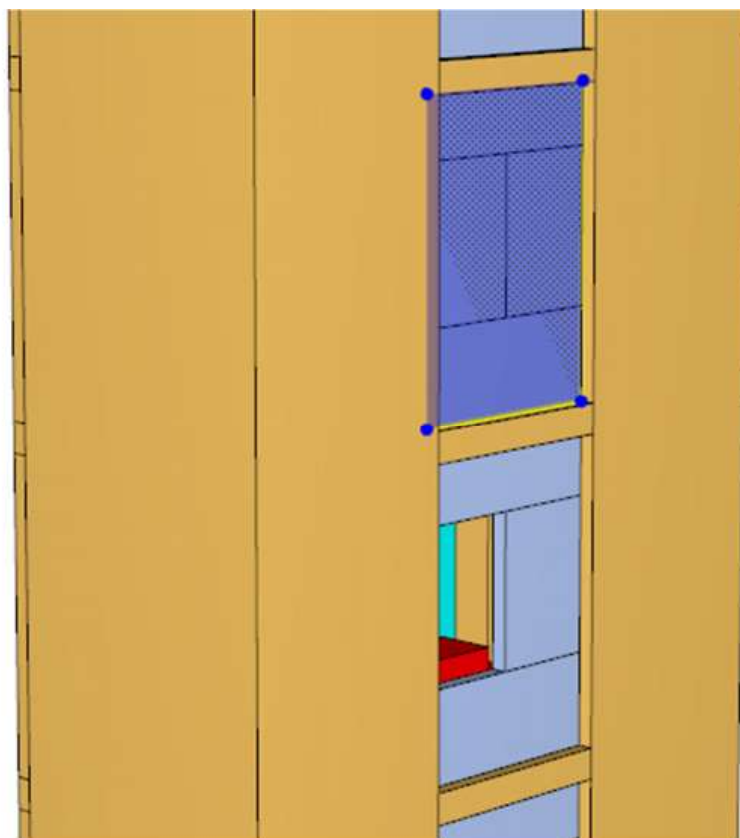


Рисунок 6.4 – Зона измерения теплового потока и температуры стекла

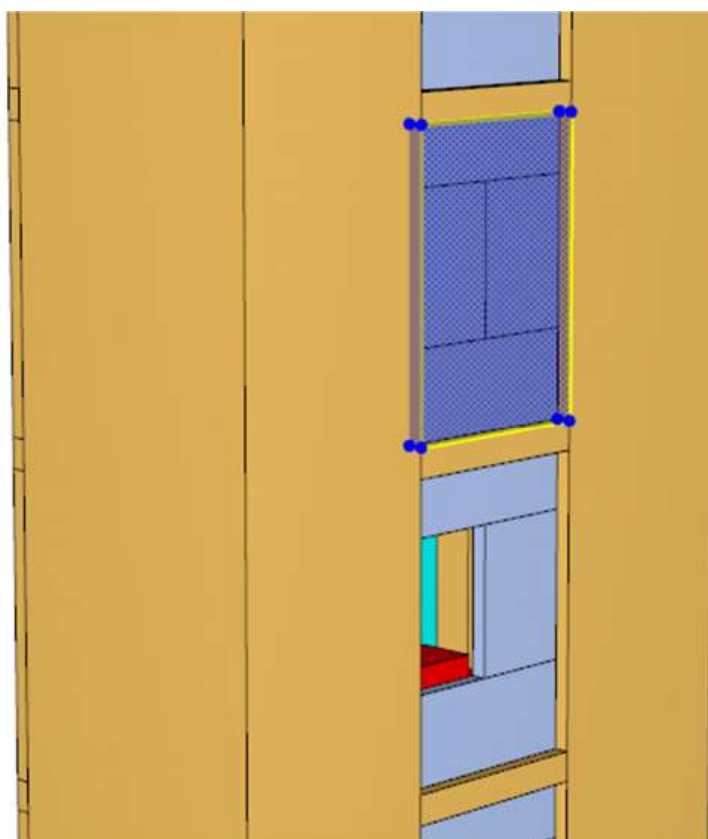


Рисунок 6.5 – Зона измерения температуры воздуха
вблизи поверхности стекла

6.3. Результаты моделирования

Результаты математического моделирования рассматриваемого сценария пожара показывают, что площадь горения, равная удвоенной площади помещения, полностью охватывается пламенем за 677 с, при этом температура в нагретом слое достигает 300 °С и приводит к вскрытию остекления помещения очага пожара через 286 с от начала горения (рисунок 6.6).

Мощность тепловыделения пожара достигает 7 МВт (рисунки 6.7–6.9). Скачок графика в момент 286 с соответствует вскрытию остекления и резкому изменению условий газообмена.

Температура газовой среды в помещении очага пожара достигает 750 °С, снаружи здания – до 650 °С (рисунок 6.10, 6.11).

Ветер со скоростью 3,8 м/с направлен перпендикулярно на фасад здания в течение всего времени моделирования (рисунки 6.12, 6.13).

Дым и продукты горения под действием ветра распространяются вплотную к поверхности стены здания (рисунок 6.14).

Максимальный тепловой поток, падающий на поверхность остекления помещения вышележащего этажа не превышает 11 кВт/м² (рисунки 6.15, 6.16).

Температура поверхности стекла помещения вышележащего этажа за время 15 минут не достигает значения 300 °С; максимальная температура составляет 75 °С (рисунки 6.17, 6.18).

Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа составляет 315 °С и также не превышает критическое значение 600 °С (рисунок 6.19).

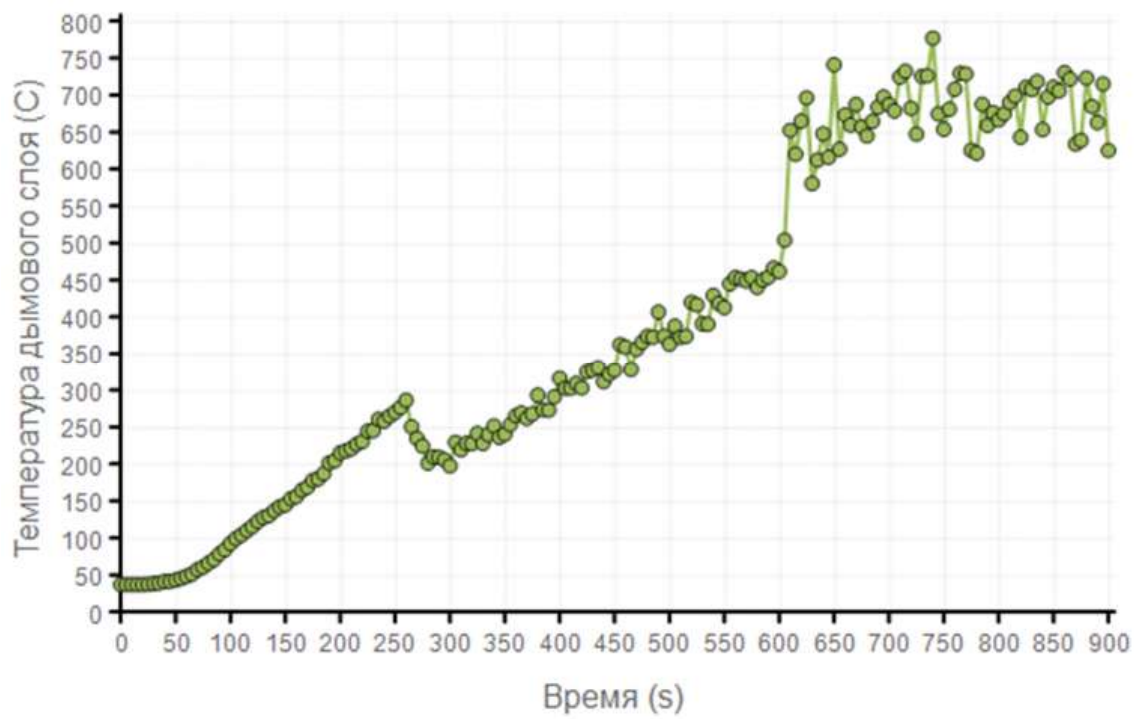


Рисунок 6.6 – Температура дымового слоя в помещении очага пожара

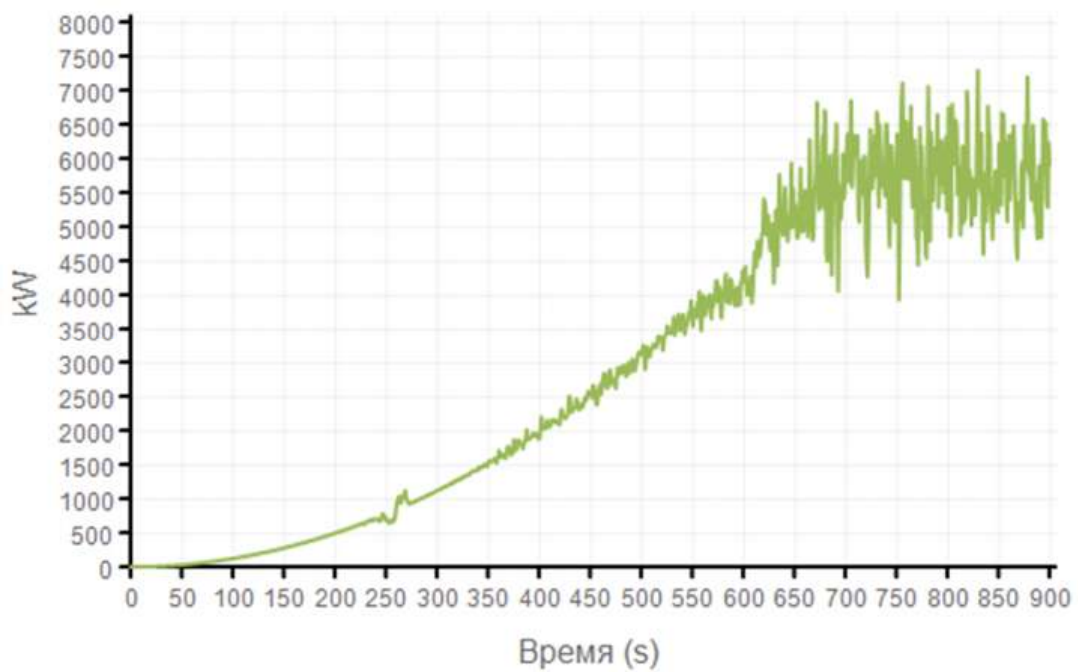


Рисунок 6.7 – Мощность тепловыделения очага пожара

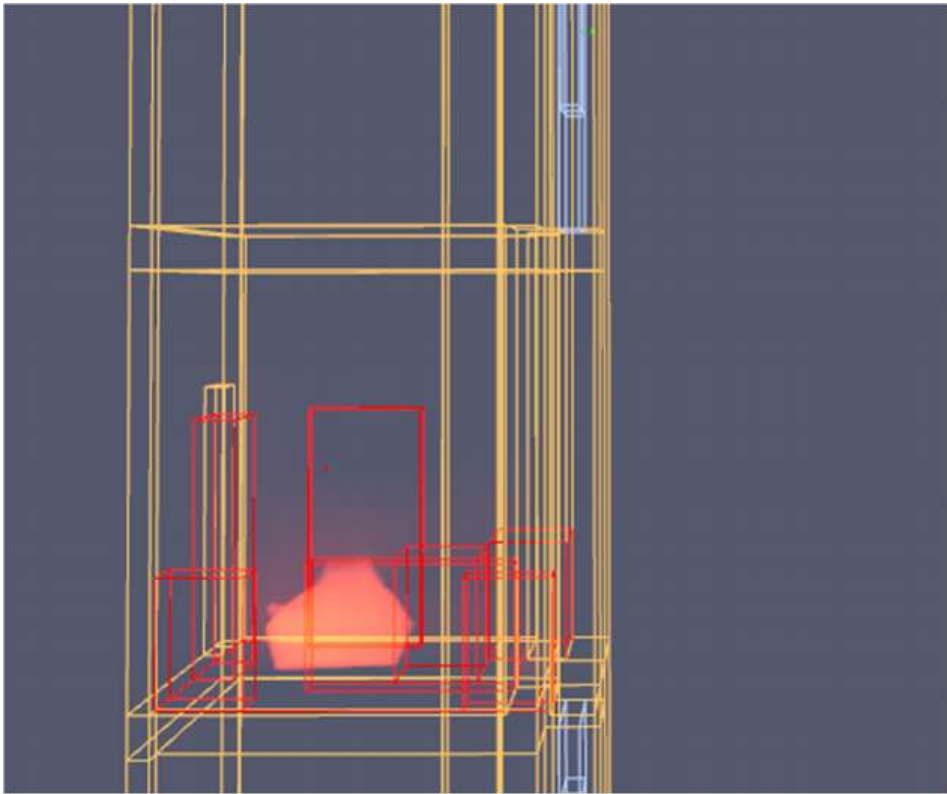


Рисунок 6.8 – Тепловыделение перед вскрытием остекления проема

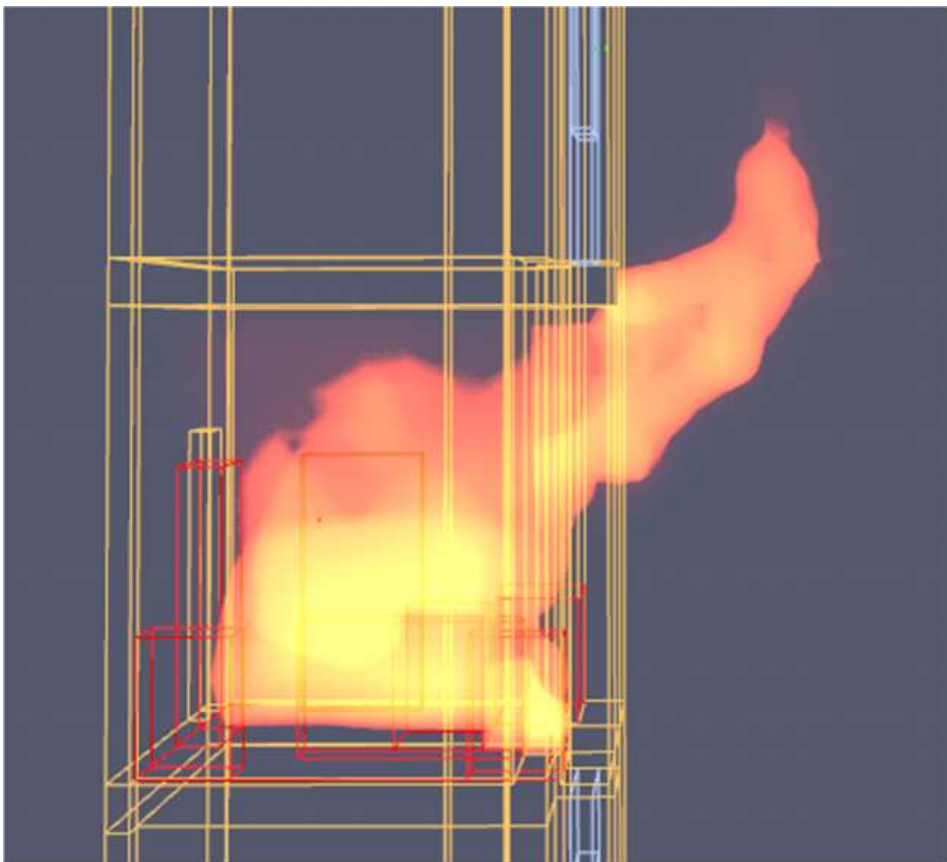


Рисунок 6.9 – Тепловыделение на момент 900 с

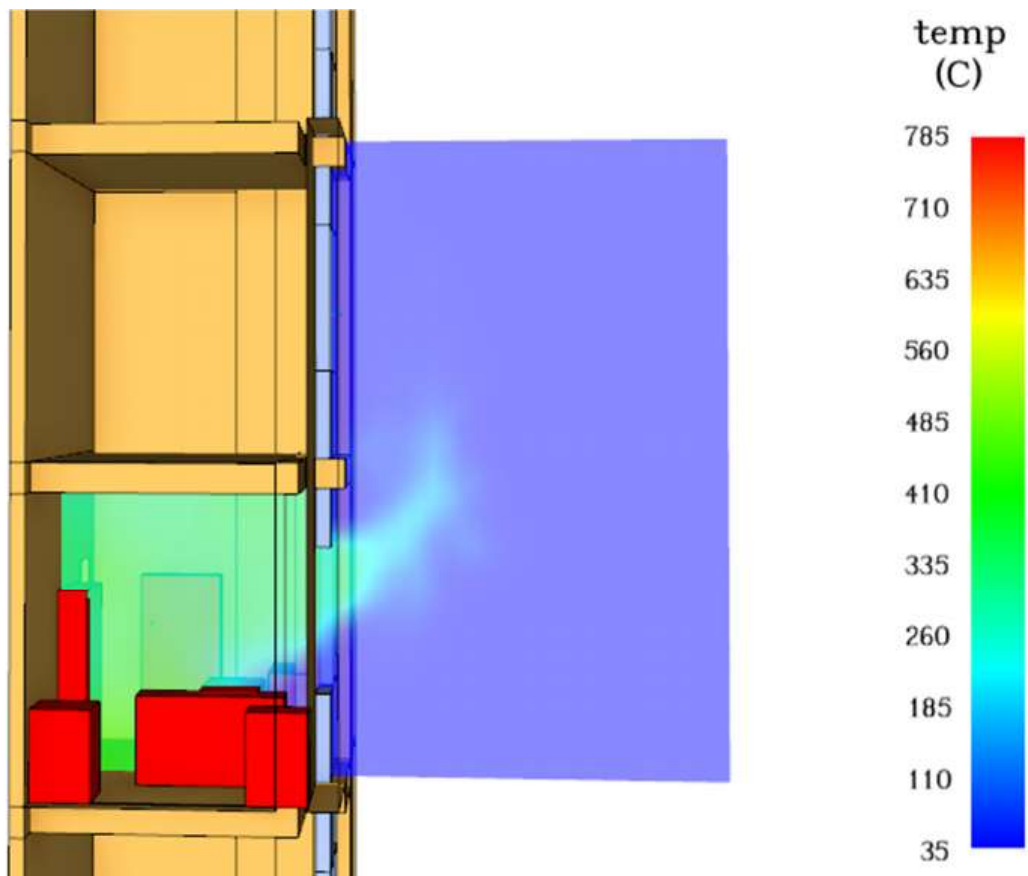


Рисунок 6.10 – Температура воздуха перед вскрытием остекления проема

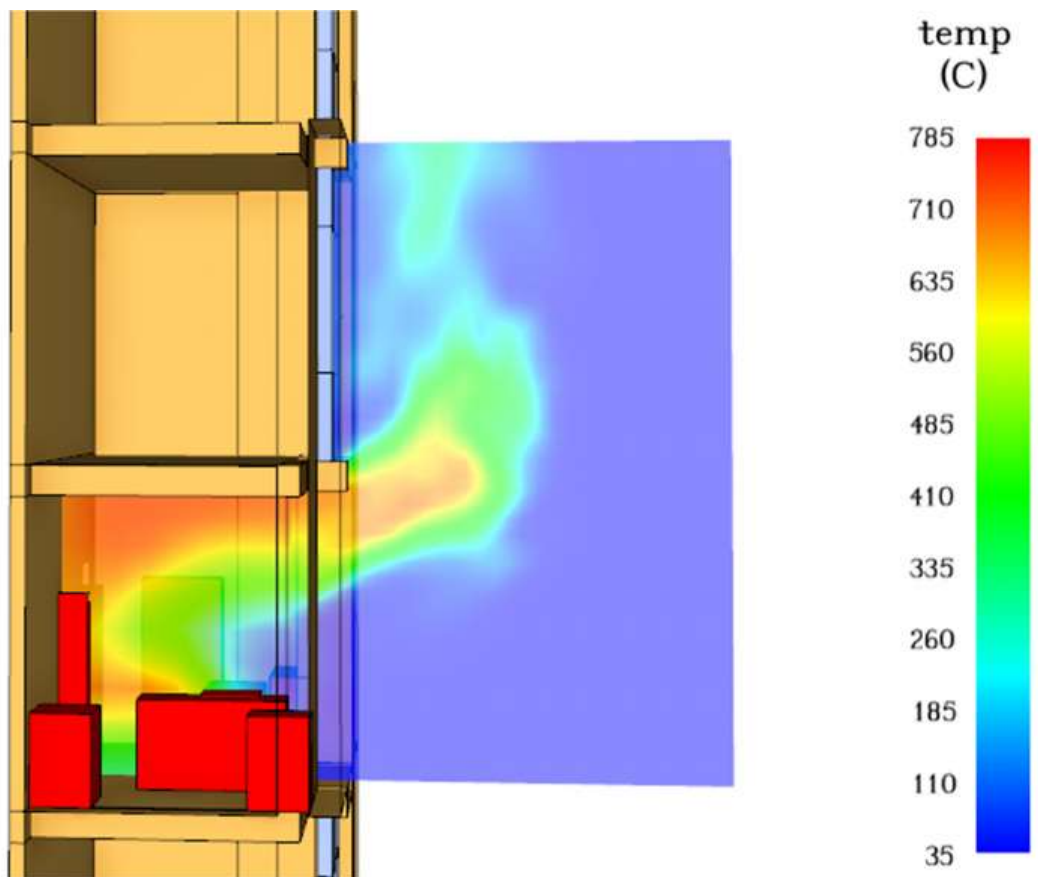


Рисунок 6.11 – Температура воздуха на момент 900 с

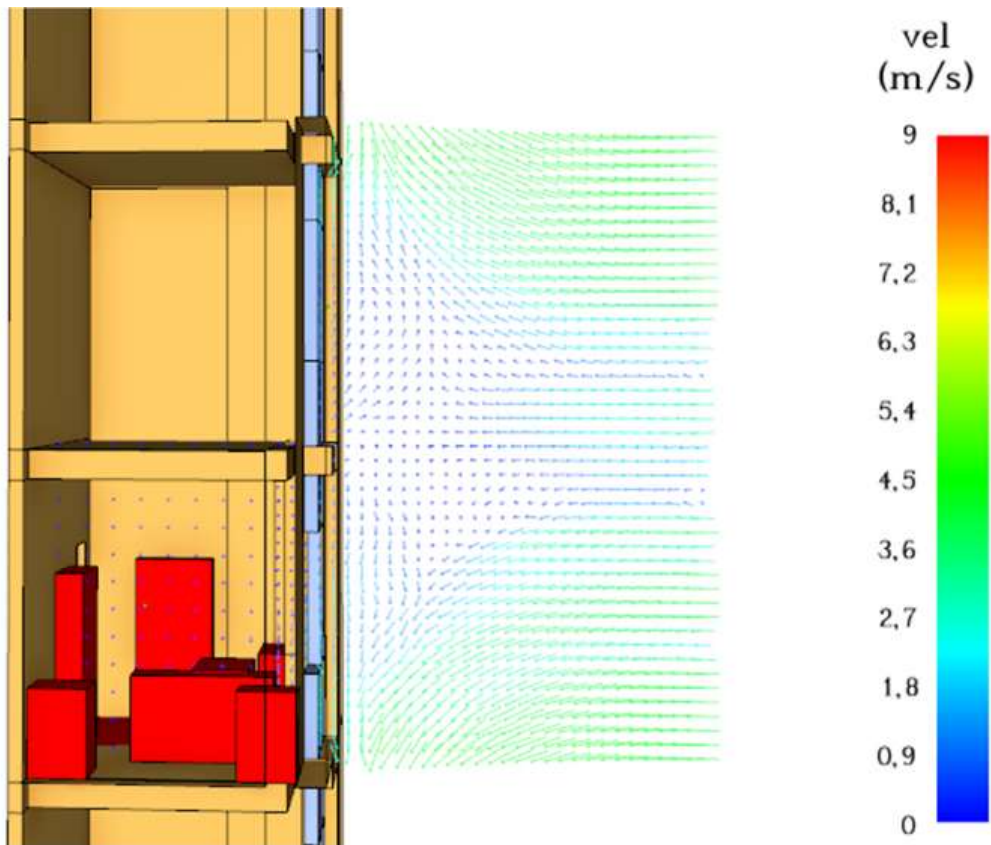


Рисунок 6.12 – Направление и скорость движения воздуха в начальный момент

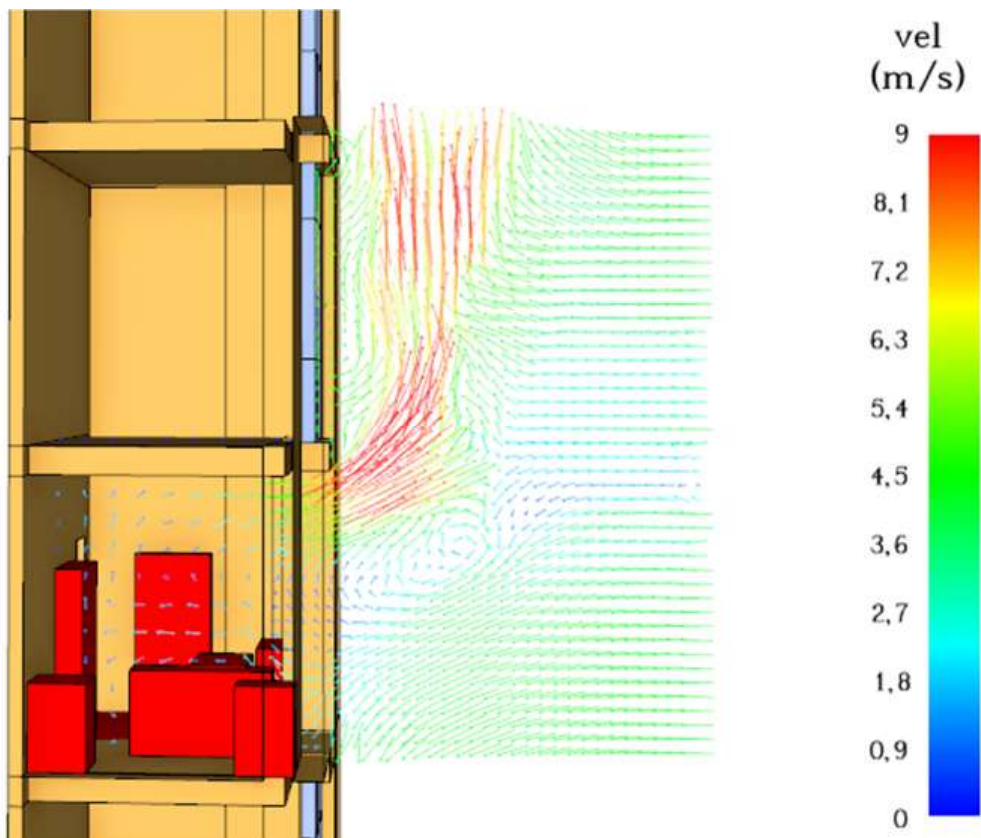


Рисунок 6.13 – Направление и скорость движения воздуха в развитой стадии пожара

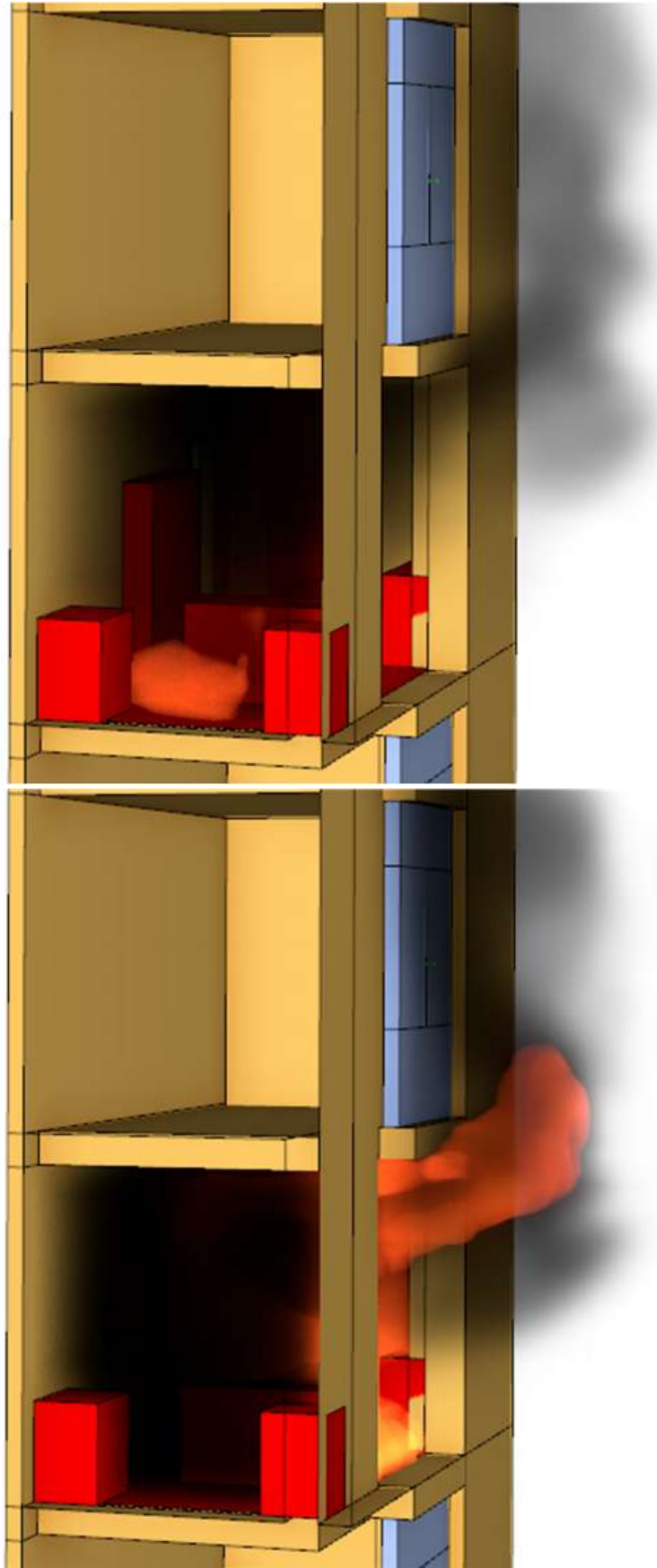


Рисунок 6.14 – Распространение дыма и продуктов горения
в различные моменты времени

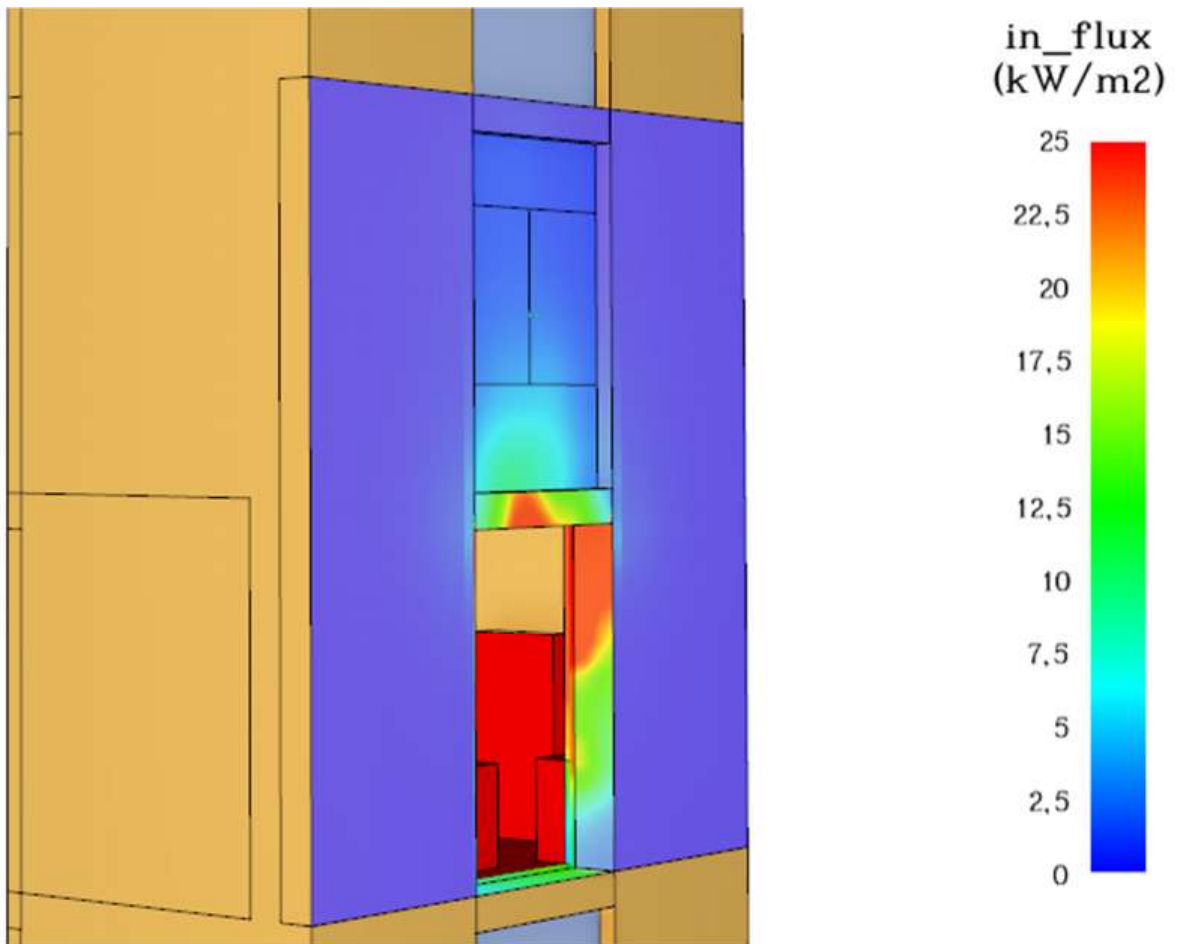


Рисунок 6.15 – Тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

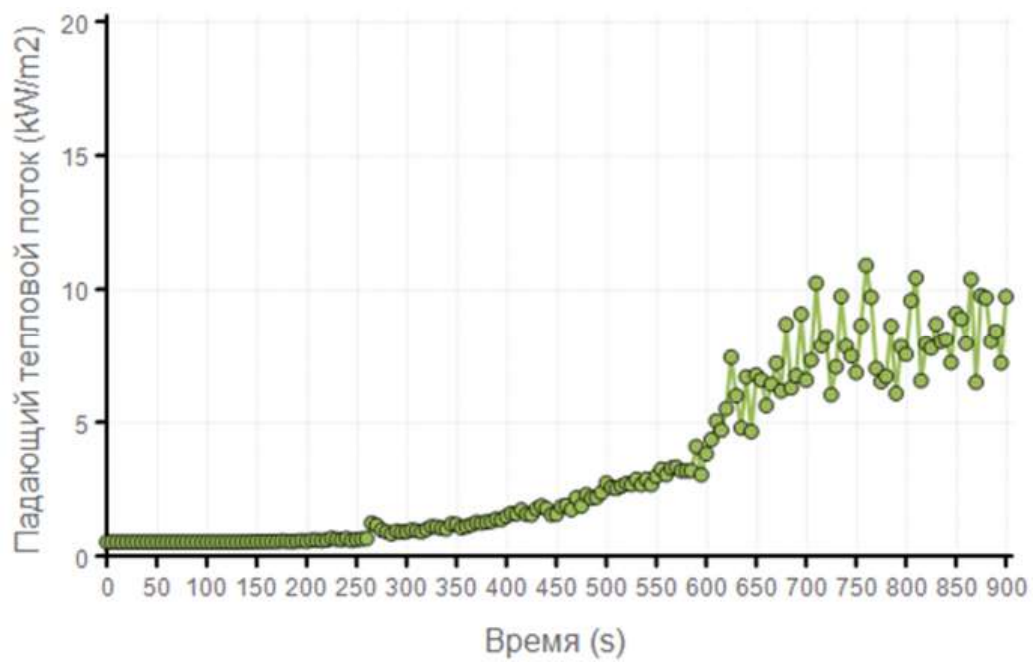


Рисунок 6.16 – Максимальный тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

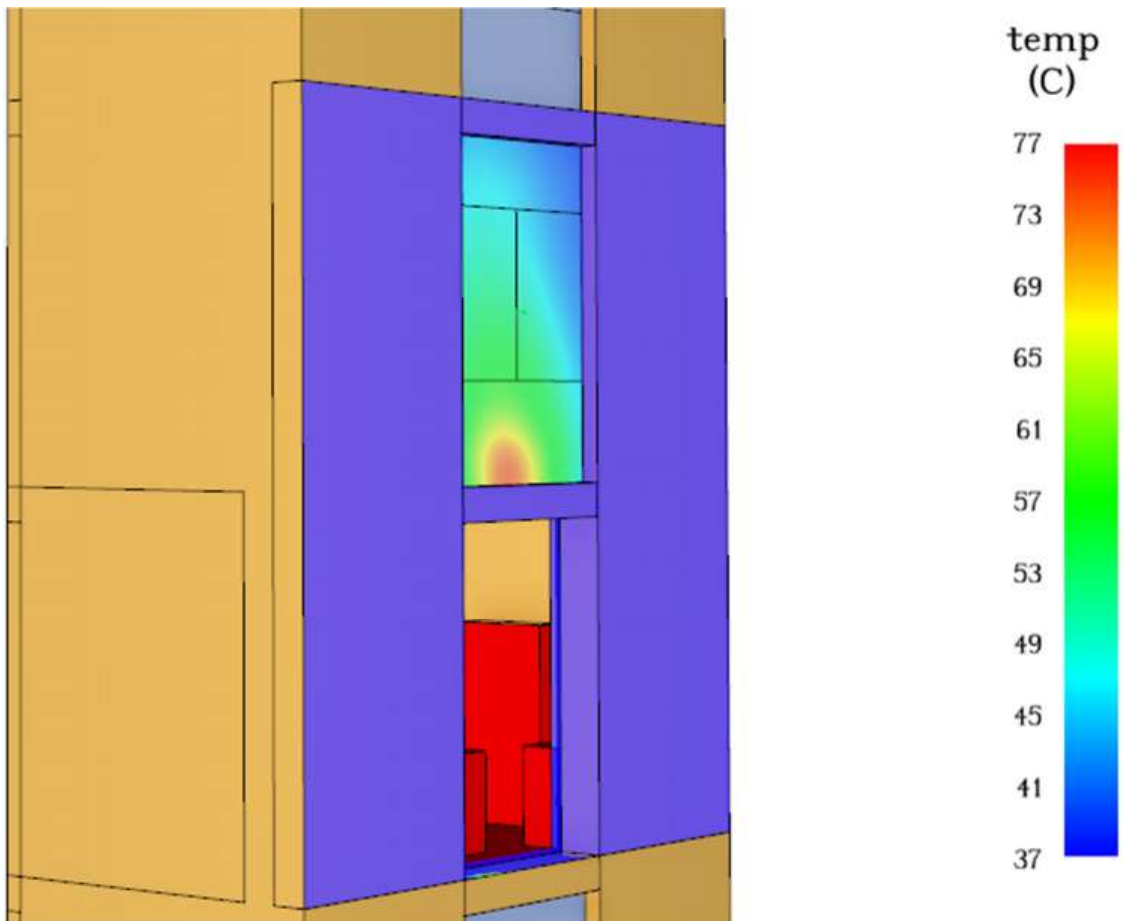


Рисунок 6.17 – Температура поверхности стекла

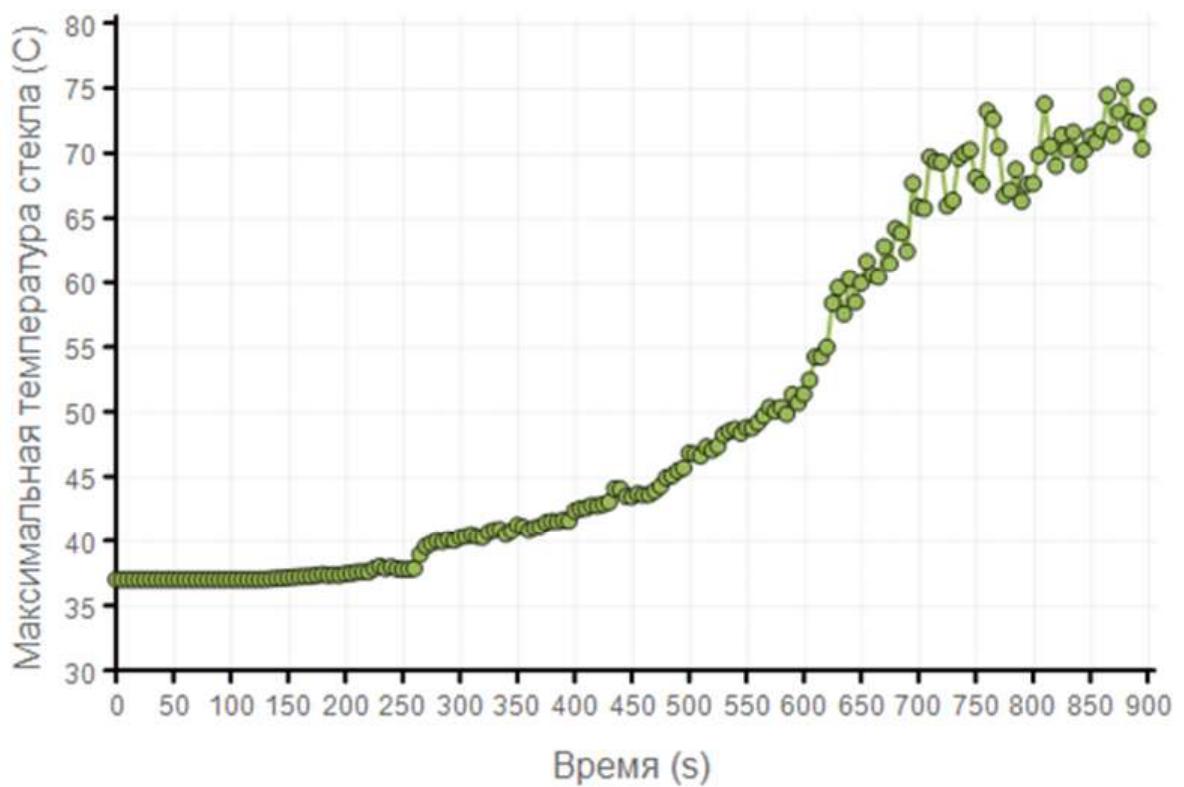


Рисунок 6.18 – Максимальная температура поверхности остекления помещения вышележащего этажа

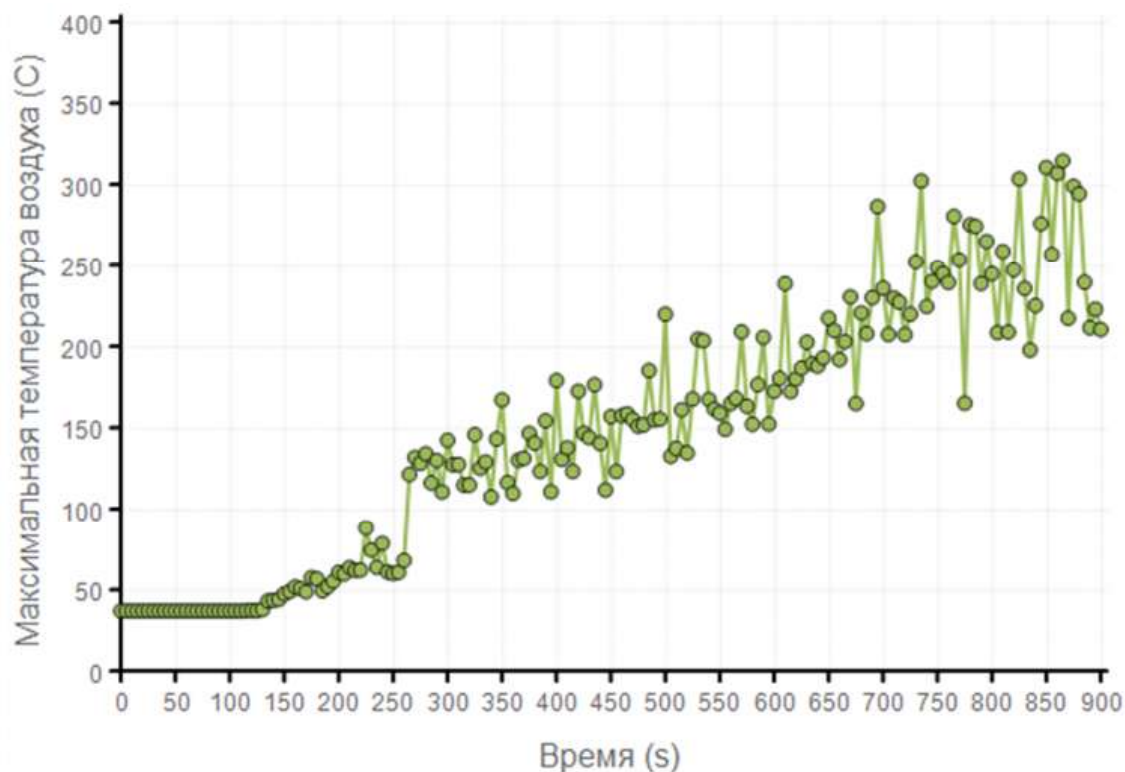


Рисунок 6.19 – Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа

6.4. Вывод

Результаты моделирования позволяют заключить следующее.

Среднеобъемная температура в нагретом слое помещения очага пожара превышает 300 °С, что приводит к вскрытию остекления.

Плотность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа в течение 15 минут не достигает критического значения 25 кВт/м².

Максимальная температура стекла не превышает критическое значение 300 °С, а максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла не превышает критическое значение 600 °С в течение 15 минут.

РАЗДЕЛ 7. ВИТРАЖ В-6

7.1. Топология модели

Модель здания выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2023 (рисунок 7.1–7.2).

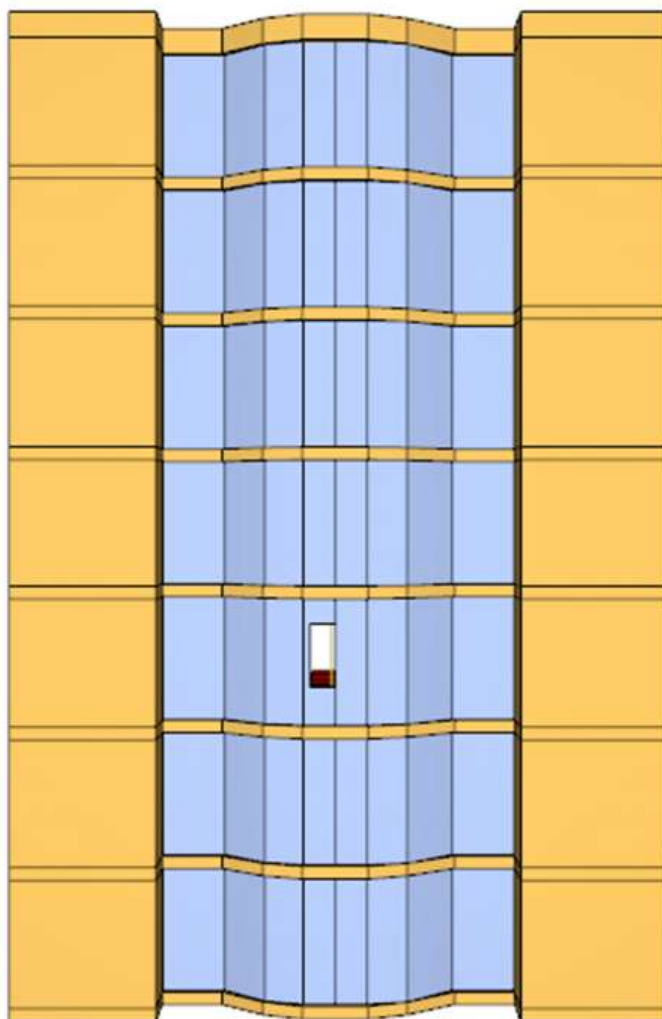


Рисунок 7.1 – Общий вид фасада здания с помещением очага пожара

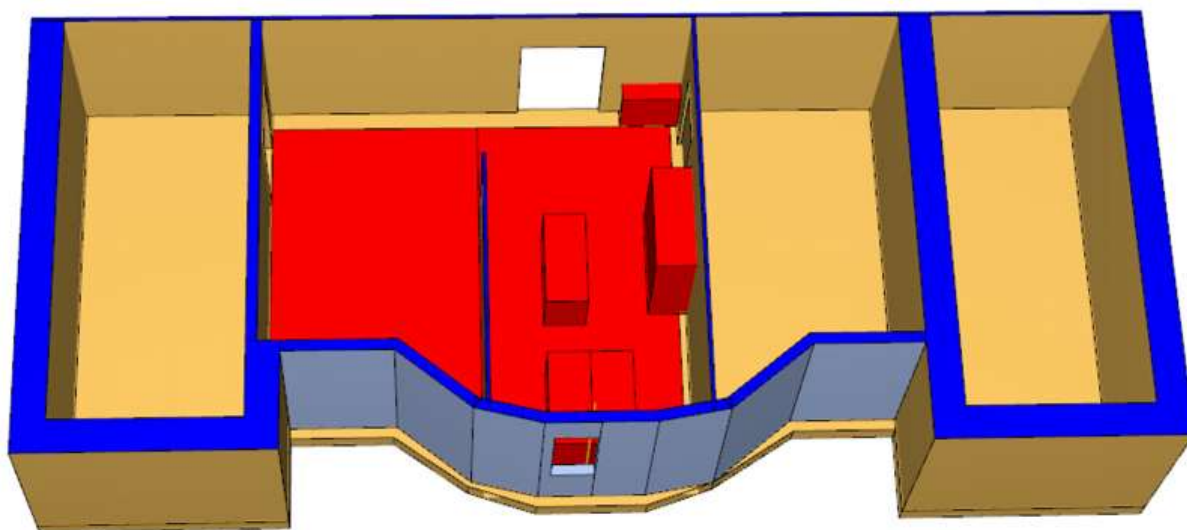


Рисунок 7.2 – Размещение горючей нагрузки в помещении очага пожара

7.2. Величины и плоскости измерения

Для решения задач настоящего исследования необходимо определение полевым методом следующих термогазодинамических параметров пожара:

- изменение температуры воздуха в помещении очага пожара и снаружи здания;
- температура поверхности и интенсивность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа.

Указанные плоскости и зоны измерения представлены на рисунках 7.3–7.5.

Согласно указанным координатам и измеряемым величинам в FDS введен следующий код.

Код FDS

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Сечение', PBX=1.2/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='Сечение01', PBX=1.2/  
&DEVC ID='Падающий тепловой поток 1_MAX', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=0.75,1.5,-6.0,-6.0,9.9,12.9/  
&DEVC ID='Температура1_MAX', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=0.75,1.5,-6.0,-6.0,9.9,12.9/  
&DEVC ID='Температура в-ха_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=0.75,1.5,-6.15,-6.0,9.9,12.9/
```

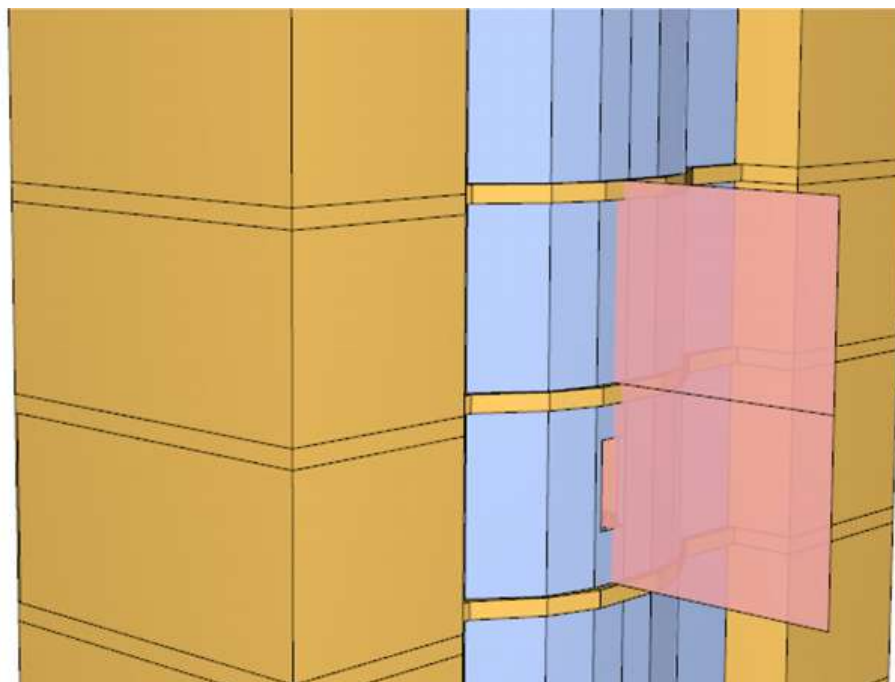


Рисунок 7.3 – Плоскость измерения температуры воздуха, направления и скорости ветра

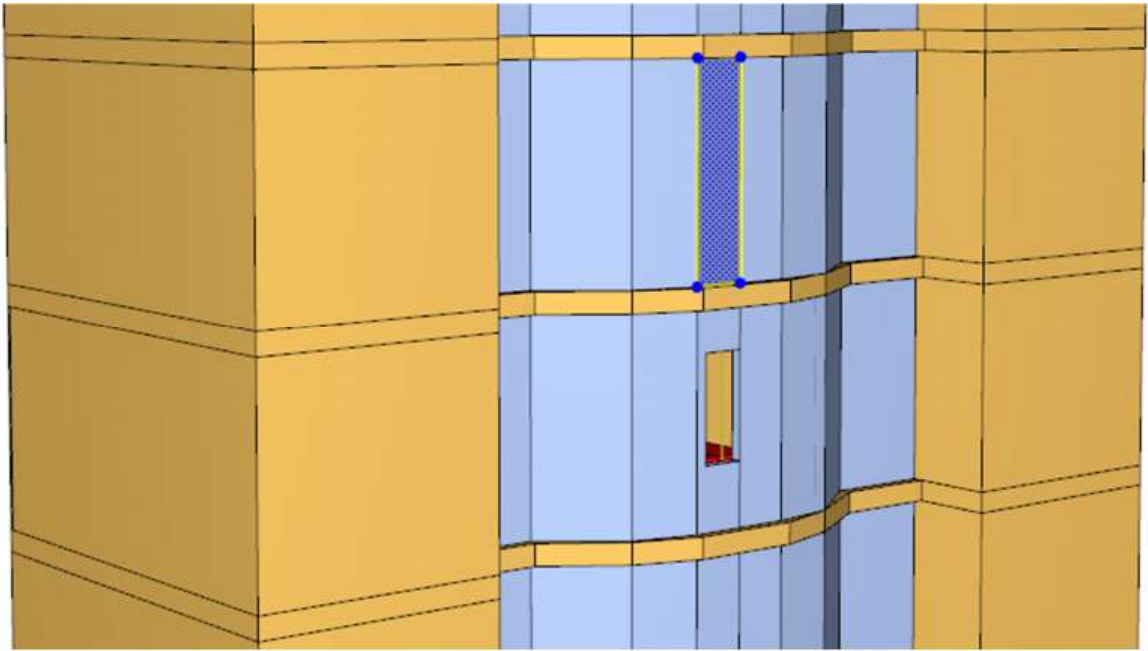


Рисунок 7.4 – Зона измерения теплового потока и температуры стекла

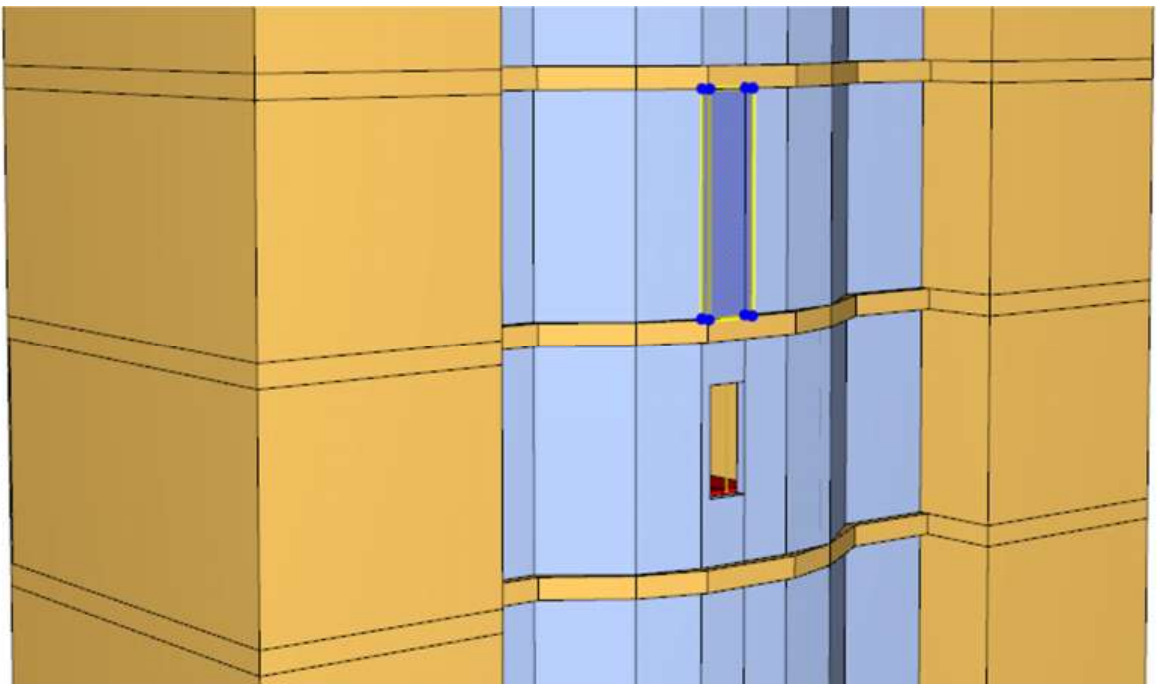


Рисунок 7.5 – Зона измерения температуры воздуха
вблизи поверхности стекла

7.3. Результаты моделирования

Результаты математического моделирования рассматриваемого сценария пожара показывают, что площадь горения, равная удвоенной площади помещения, полностью охватывается пламенем за 686 с, при этом температура в нагретом слое достигает 300 °С и приводит к вскрытию остекления помещения очага пожара через 260 с от начала горения (рисунок 7.6).

Мощность тепловыделения пожара достигает 6,5 МВт (рисунки 7.7–7.9). Скачок графика в момент 260 с соответствует вскрытию остекления и резкому изменению условий газообмена.

Температура газовой среды в помещении очага пожара достигает 900 °С, снаружи здания – до 400 °С (рисунок 7.10, 7.11).

Ветер со скоростью 3,8 м/с направлен перпендикулярно на фасад здания в течение всего времени моделирования (рисунки 7.12, 7.13).

Дым и продукты горения под действием ветра распространяются вплотную к поверхности стены здания (рисунок 7.14).

Максимальный тепловой поток, падающий на поверхность остекления помещения вышележащего этажа не превышает 3,5 кВт/м² (рисунки 7.15, 7.16).

Температура поверхности стекла помещения вышележащего этажа за время 15 минут не достигает значения 300 °С; максимальная температура составляет 56 °С (рисунки 7.17, 7.18).

Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа составляет 300 °С и также не превышает критическое значение 600 °С (рисунок 7.19).

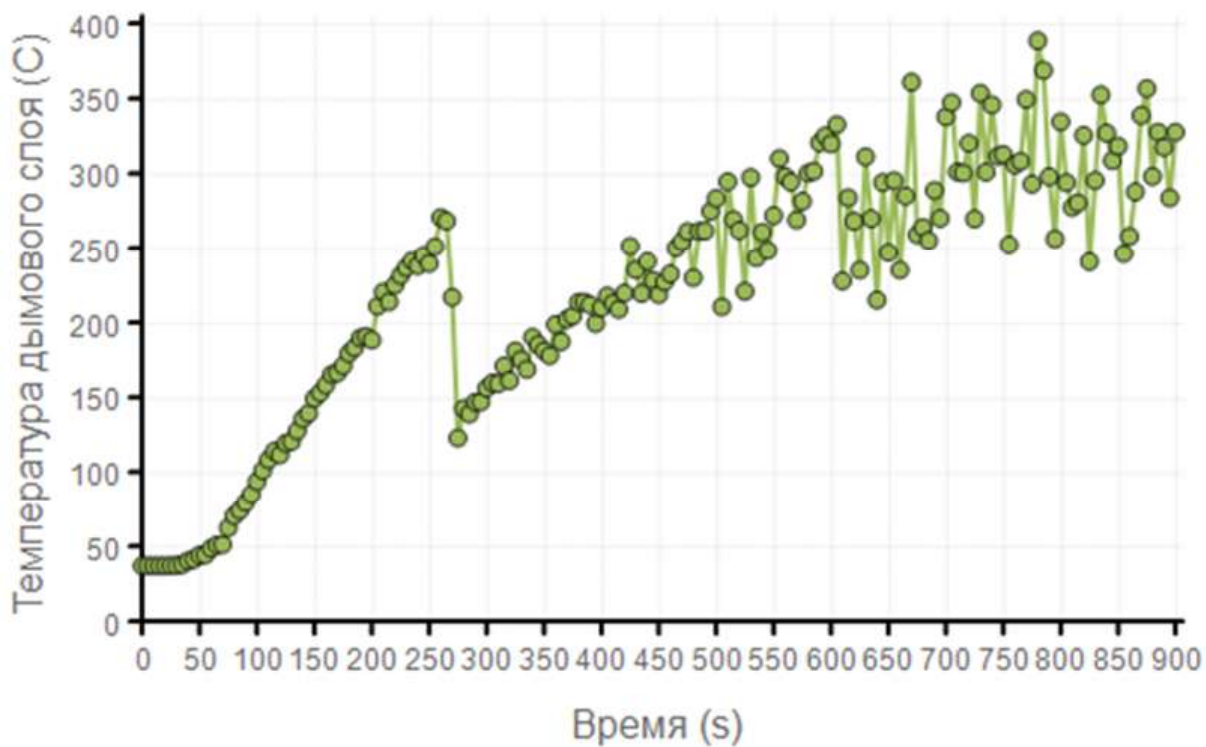


Рисунок 7.6 – Температура дымового слоя в помещении очага пожара

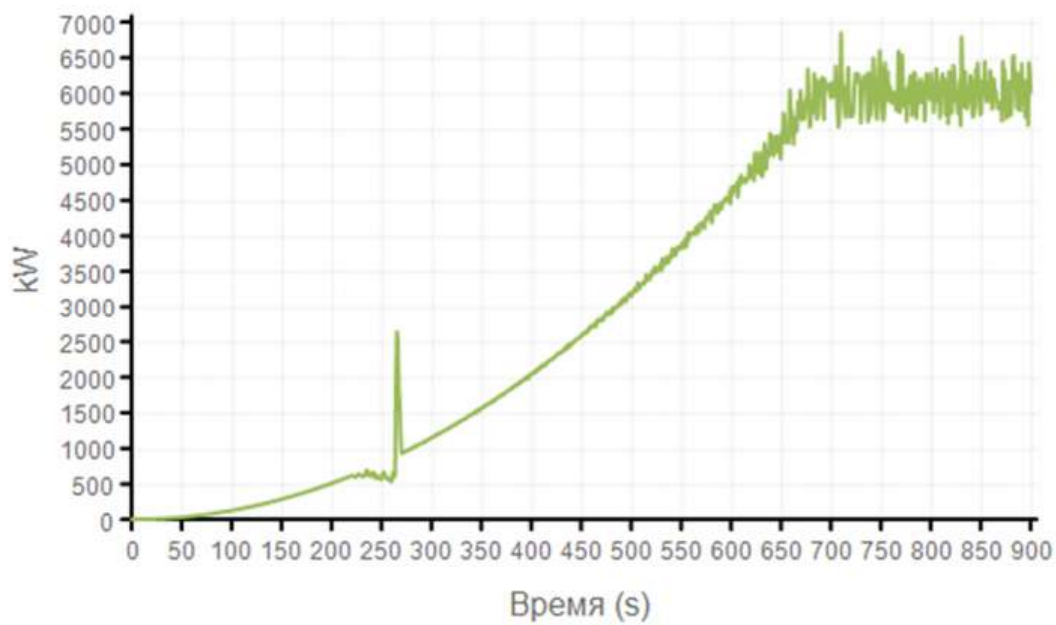


Рисунок 7.7 – Мощность тепловыделения очага пожара

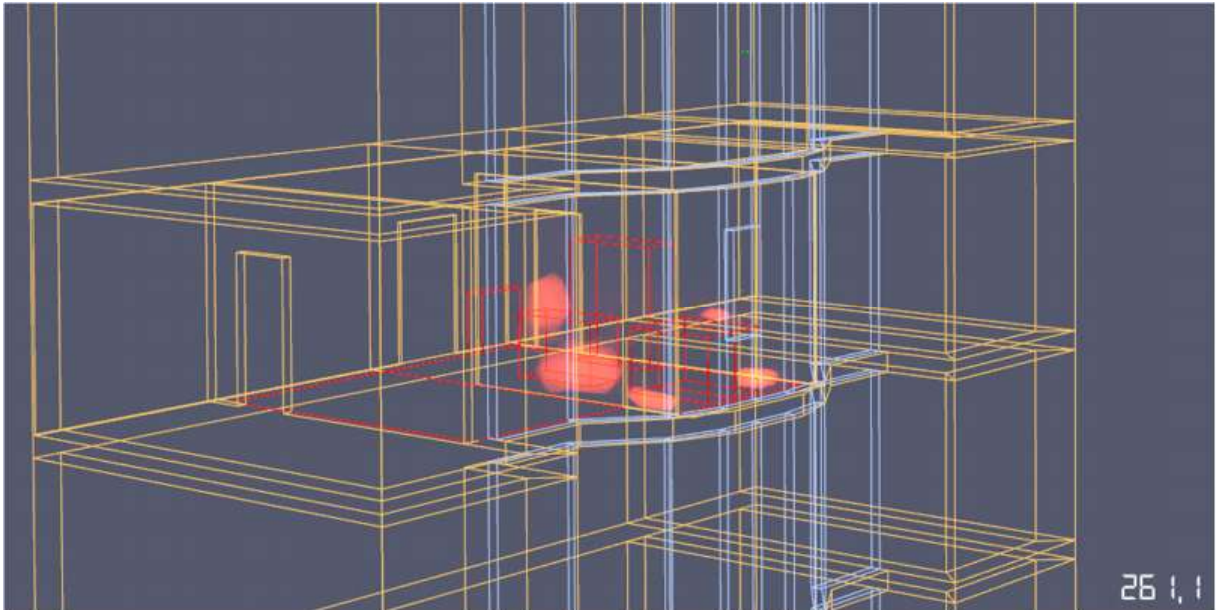


Рисунок 7.8 – Тепловыделение перед вскрытием остекления проема

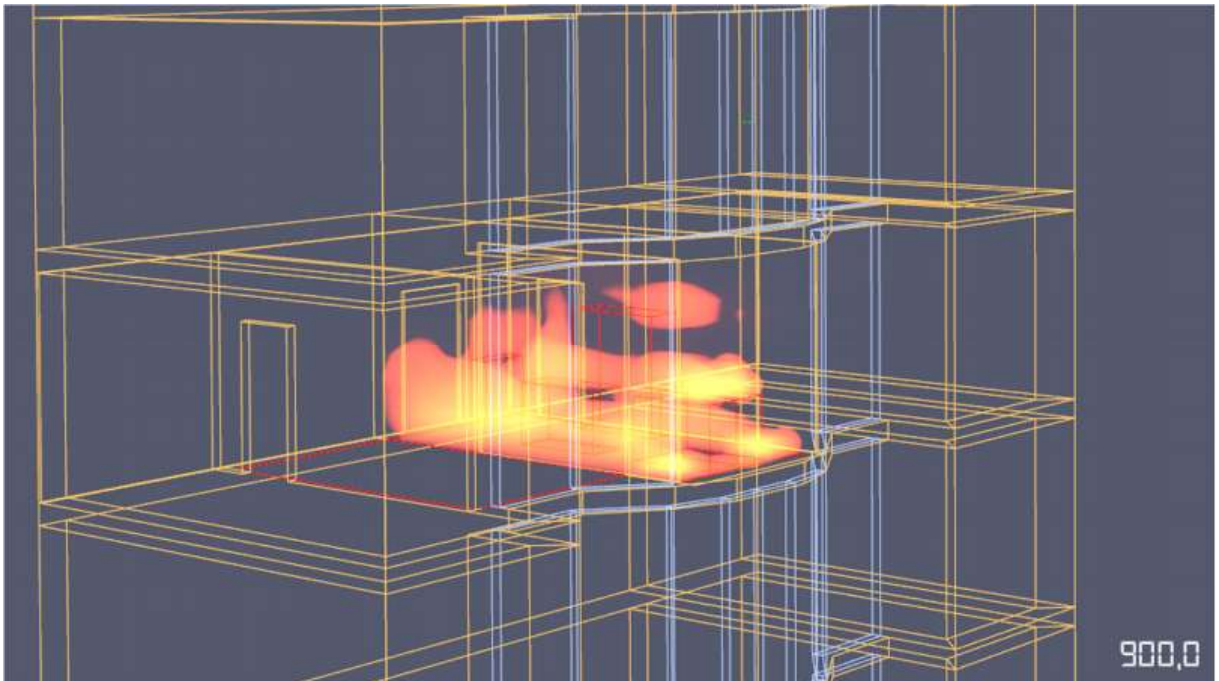


Рисунок 7.9 – Тепловыделение на момент 900 с

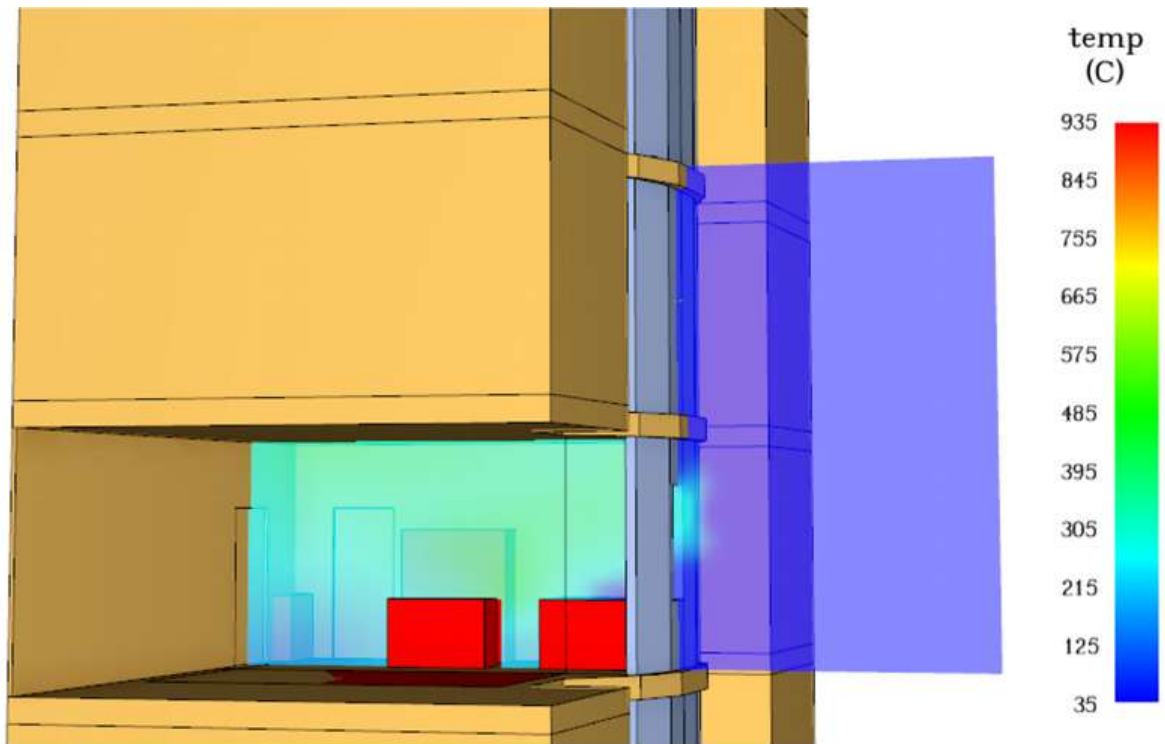


Рисунок 7.10 – Температура воздуха перед вскрытием остекления проема

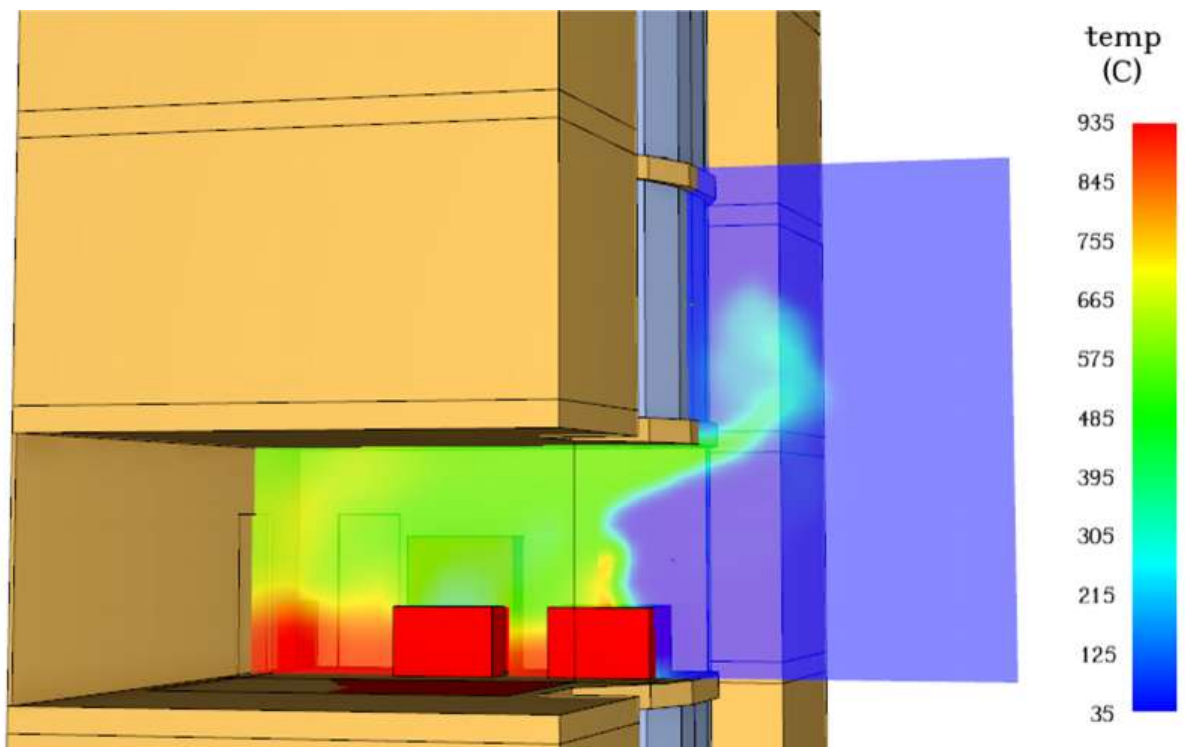


Рисунок 7.11 – Температура воздуха на момент 900 с

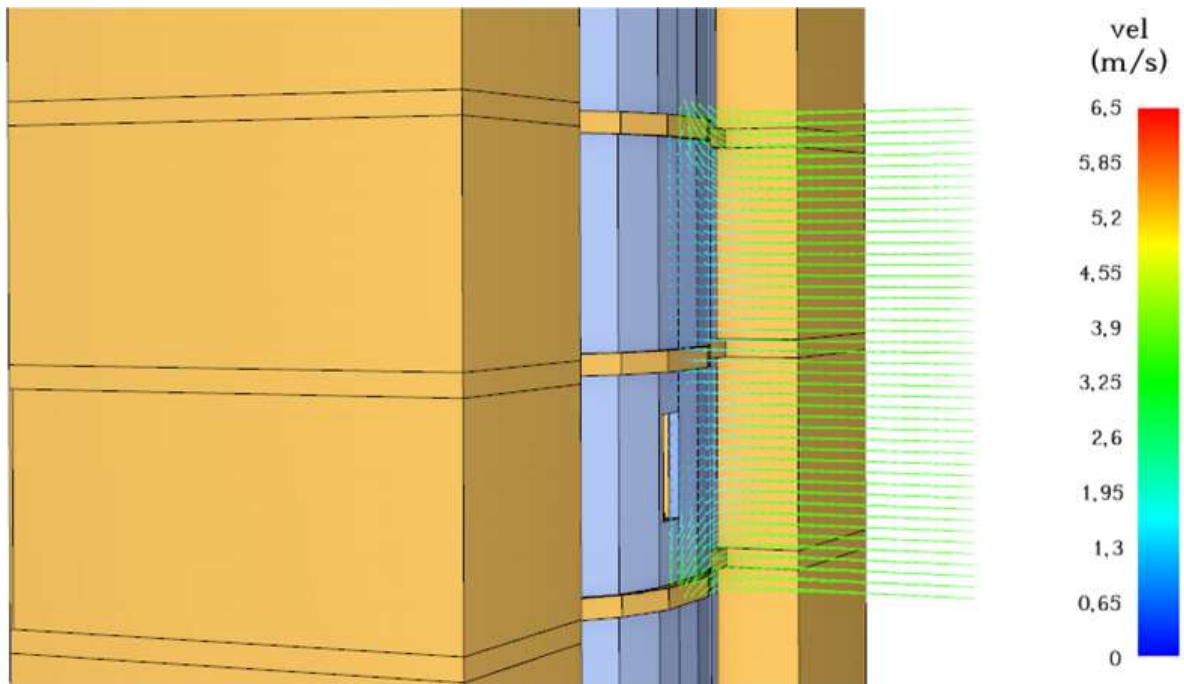


Рисунок 7.12 – Направление и скорость движения воздуха в начальный момент

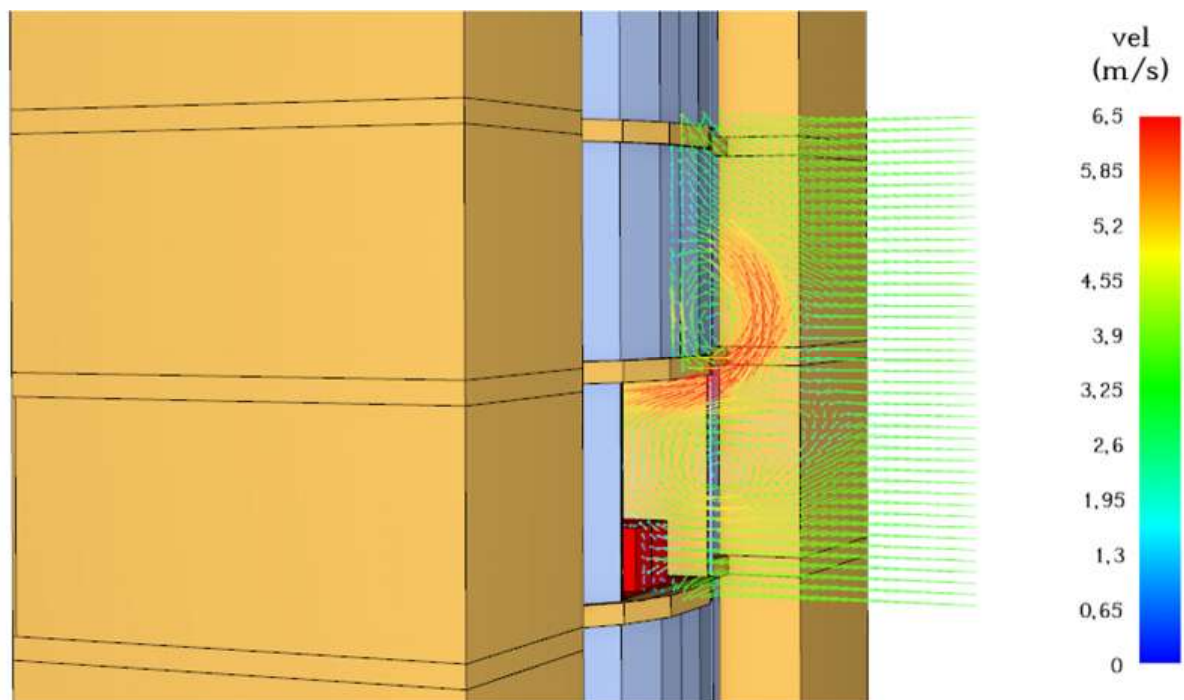


Рисунок 7.13 – Направление и скорость движения воздуха в развитой стадии пожара

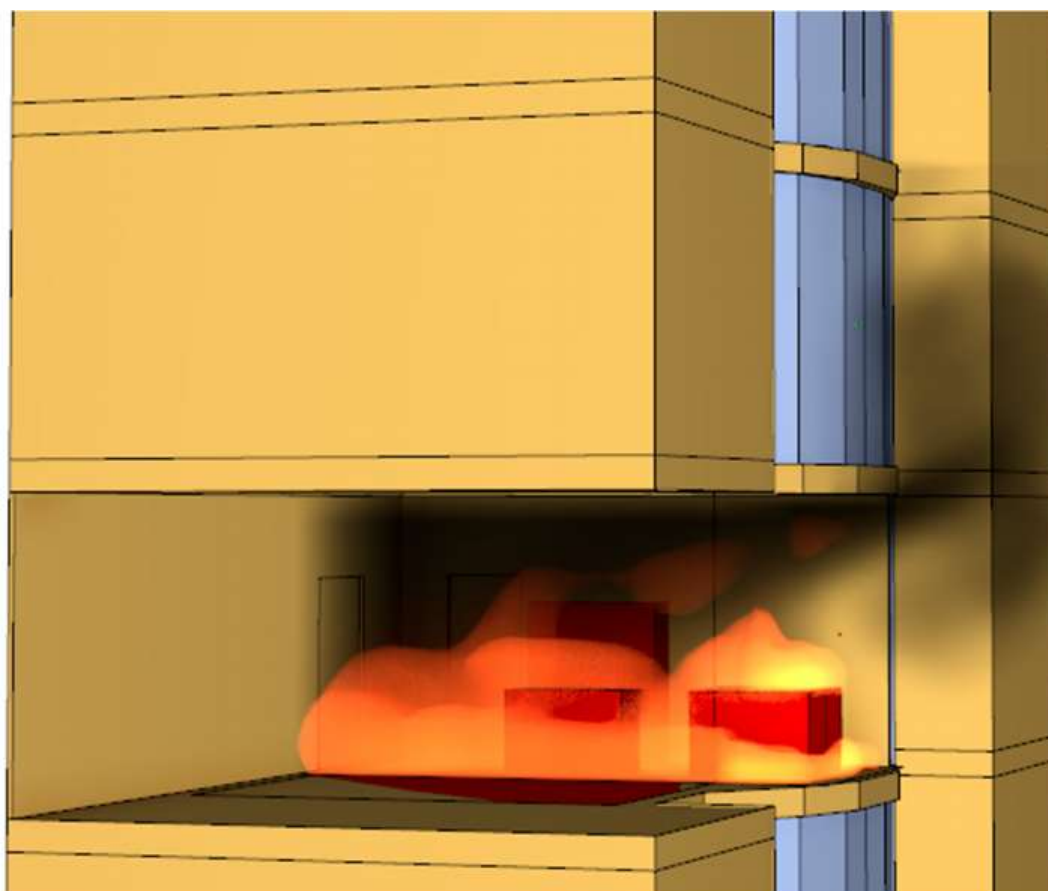
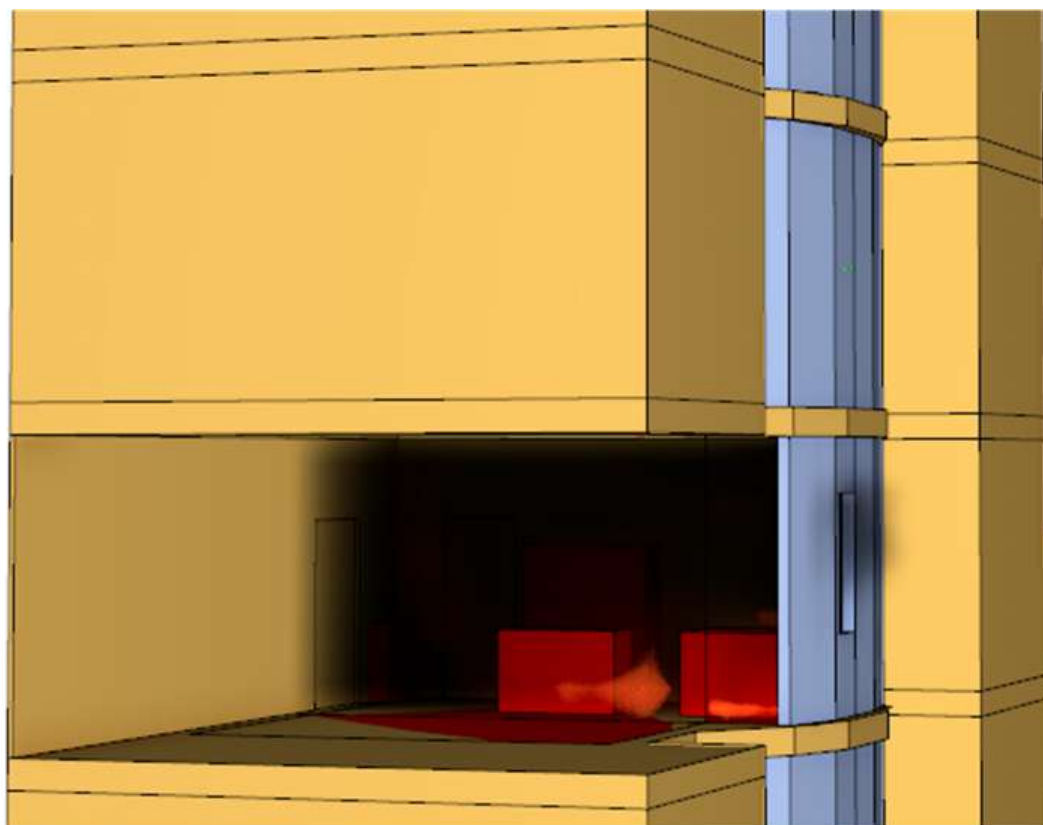


Рисунок 7.14 – Распространение дыма и продуктов горения в различные моменты времени

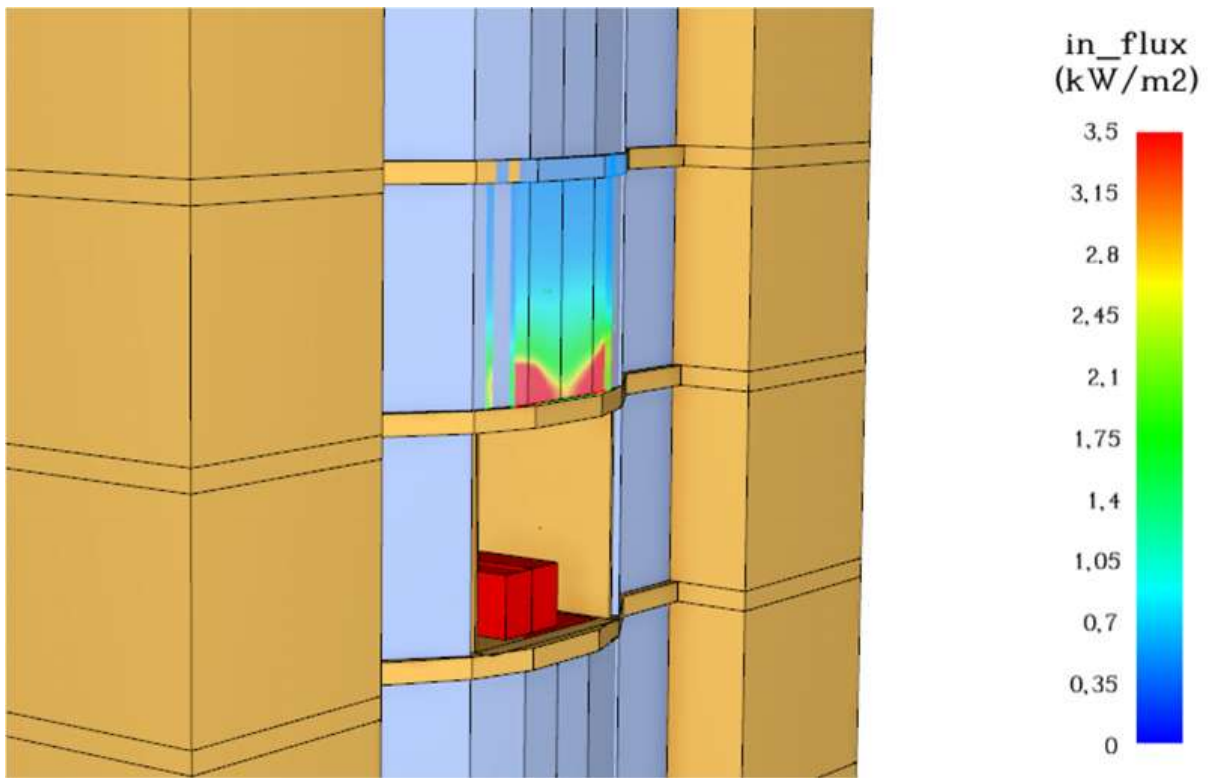


Рисунок 7.15 – Тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

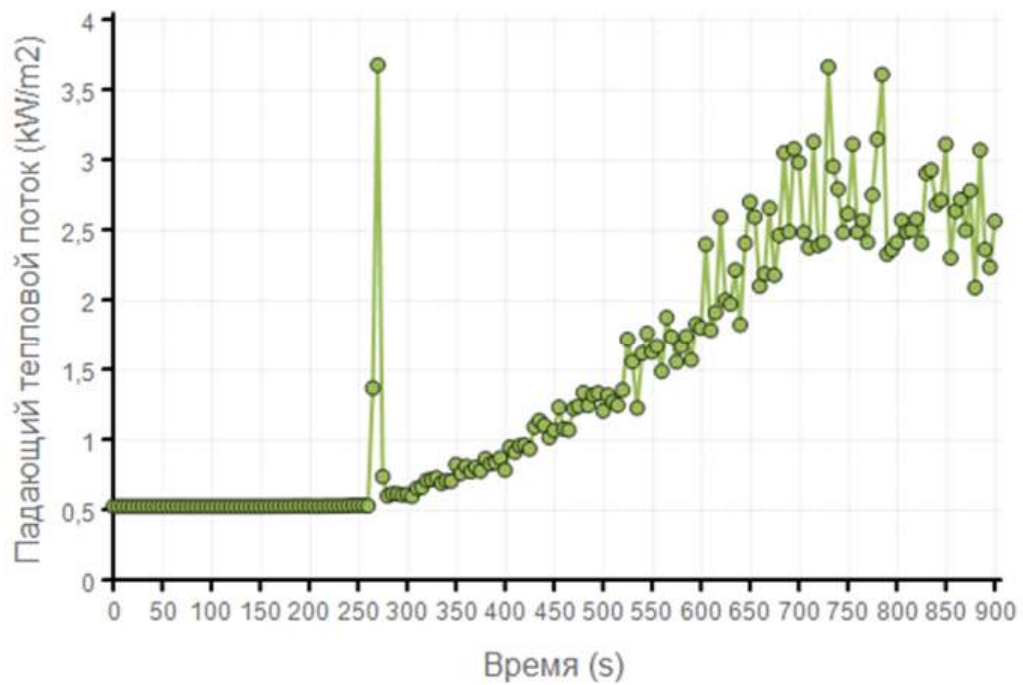


Рисунок 7.16 – Максимальный тепловой поток на поверхность остекления помещения вышележащего этажа

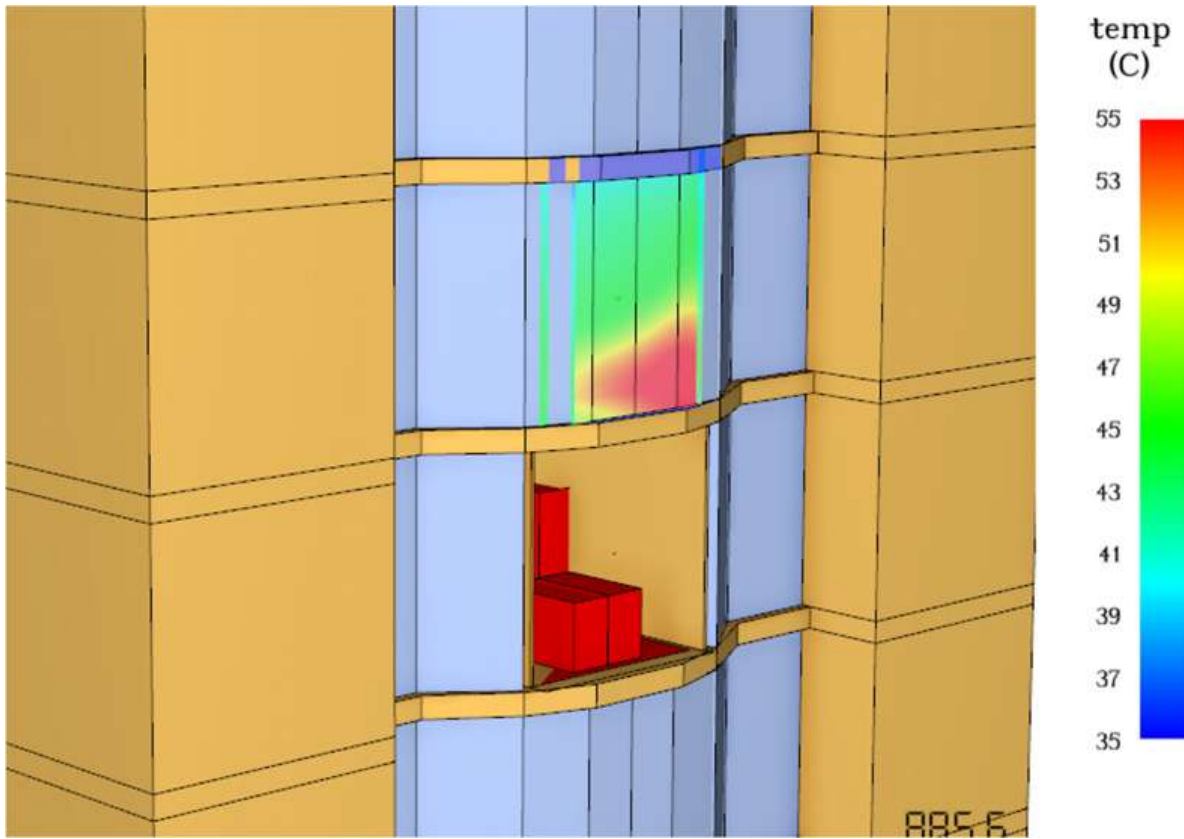


Рисунок 6.17 – Температура поверхности стекла

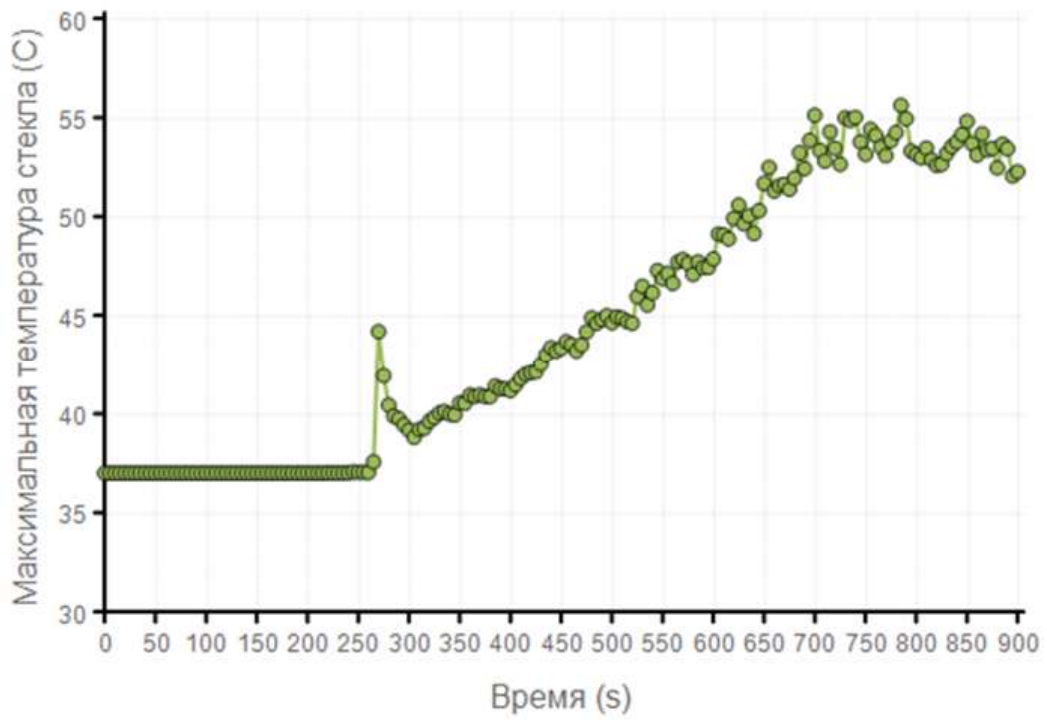


Рисунок 6.18 – Максимальная температура поверхности остекления помещения вышележащего этажа

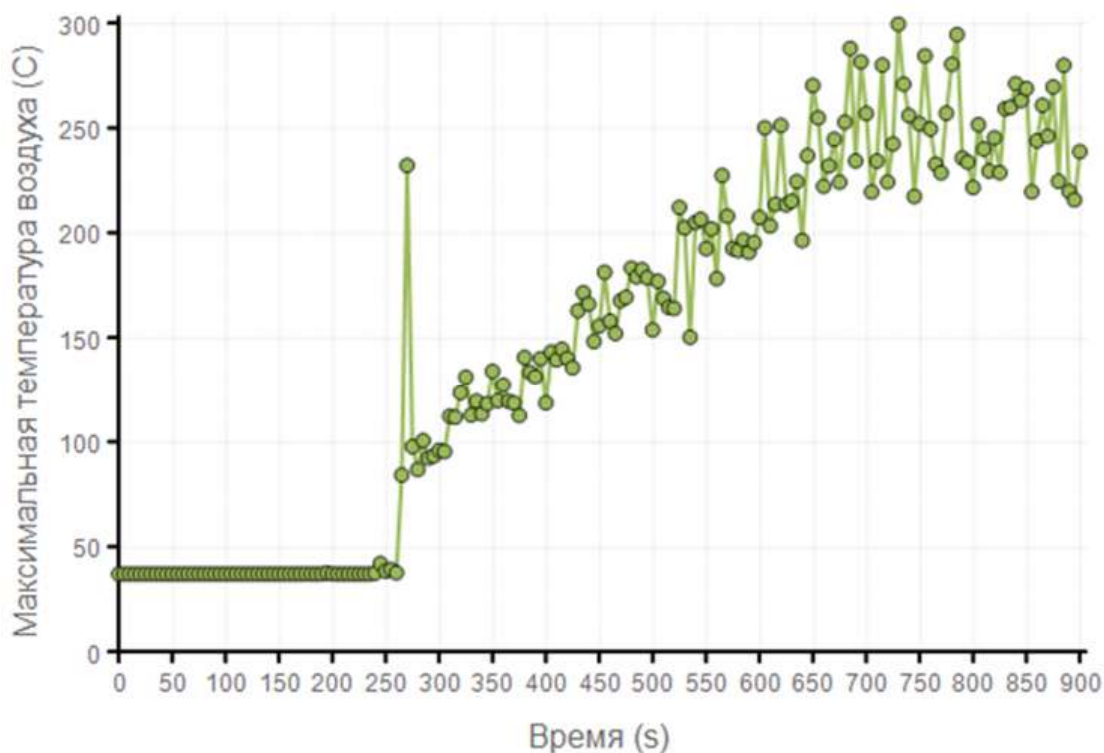


Рисунок 7.19 – Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла помещения вышележащего этажа

7.4. Вывод

Результаты моделирования позволяют заключить следующее.

Среднеобъемная температура в нагретом слое помещения очага пожара превышает 300 °С, что приводит к вскрытию остекления.

Плотность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещения вышележащего этажа в течение 15 минут не достигает критического значения 25 кВт/м².

Максимальная температура стекла не превышает критическое значение 300 °С, а максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла не превышает критическое значение 600 °С в течение 15 минут.

РАЗДЕЛ 8. ВИТРАЖ В-4. ЛЕСТНИЧНАЯ КЛЕТКА

8.1. Топология модели

Модель здания выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2023 (рисунок 8.1–8.2).

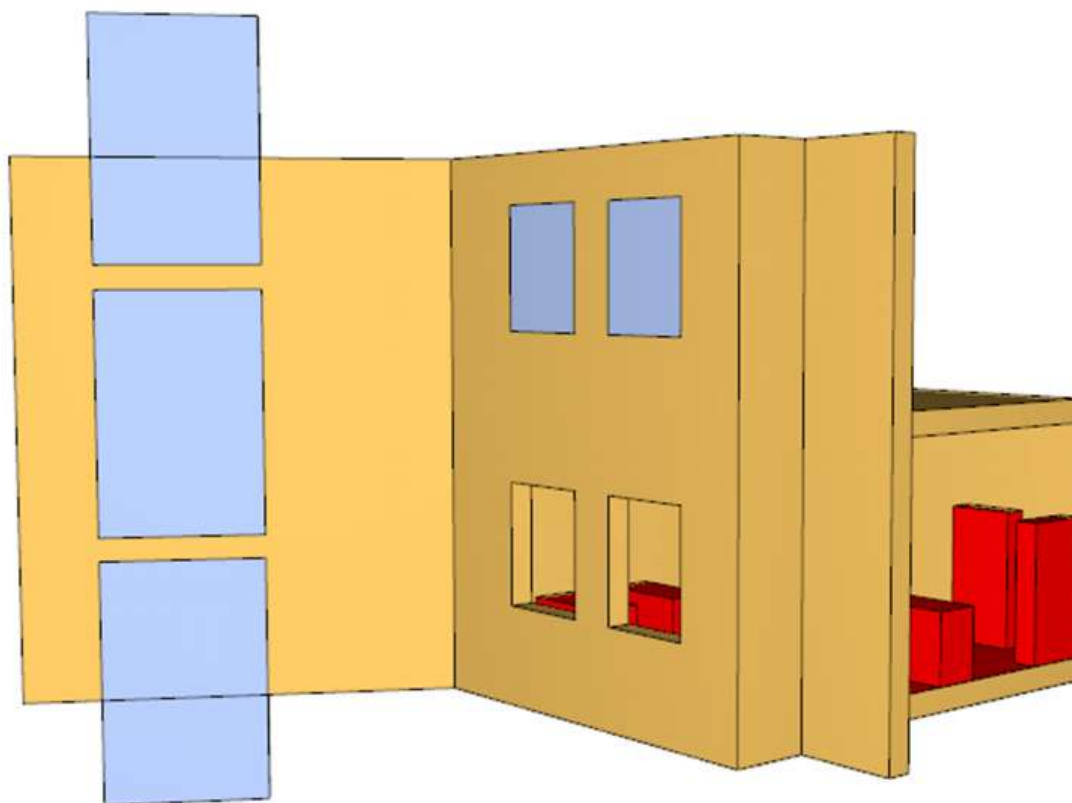


Рисунок 8.1 – Общий вид фасада здания с помещением очага пожара

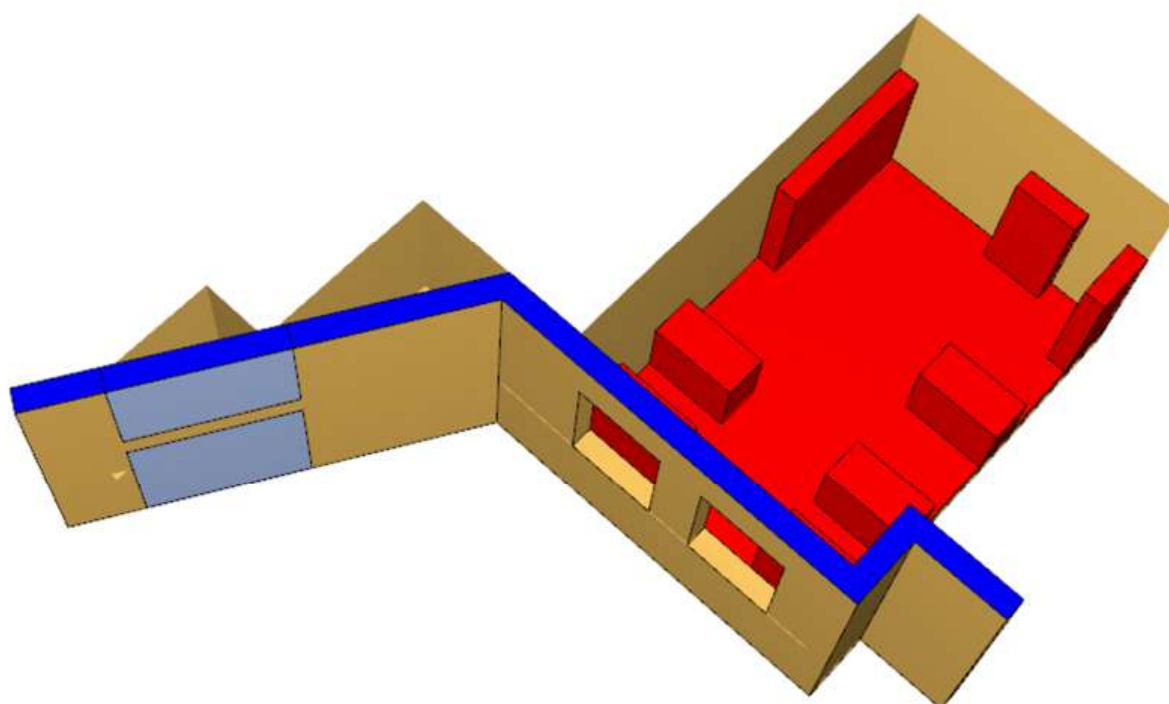


Рисунок 8.2 – Размещение горючей нагрузки в помещении очага пожара

8.2. Величины и плоскости измерения

Для решения задач настоящего исследования необходимо определение полевым методом следующих термогазодинамических параметров пожара:

- изменение температуры воздуха в помещении очага пожара и снаружи здания;
- температура поверхности и интенсивность теплового потока, падающего на поверхность остекления лестничной клетки.

Указанные плоскости и зоны измерения представлены на рисунках 8.3–8.7.

Согласно указанным координатам и измеряемым величинам в FDS введен следующий код.

Код FDS

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Сечение', PBX=-3.3/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='Сечение01', PBZ=8.7/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Сечение', PBZ=8.7/  
&DEVC ID='Падающий тепловой поток 1_MAX', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=-6.3,-6.3,-2.1,-1.95,8.25,11.25/  
&DEVC ID='Температура1_MAX', QUANTITY='WALL TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=-6.3,-6.3,-2.1,-1.95,8.25,11.25/  
&DEVC ID='Температура в-ха_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE',  
SPATIAL_STATISTIC='MAX', XB=-6.3,-6.15,-2.1,-1.95,8.25,11.25/
```

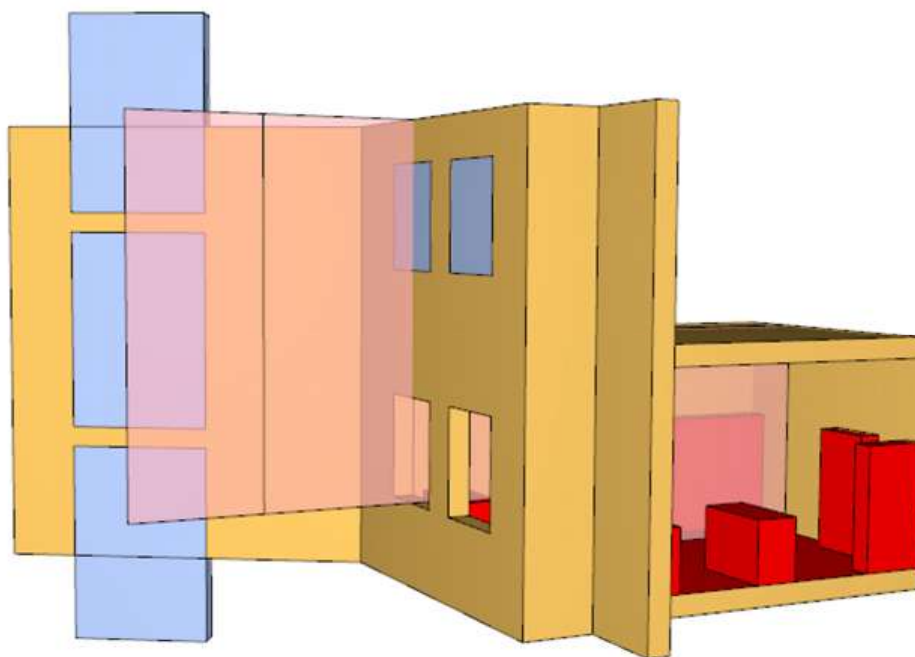


Рисунок 8.3 – Плоскость измерения температуры воздуха вдоль помещения очага пожара

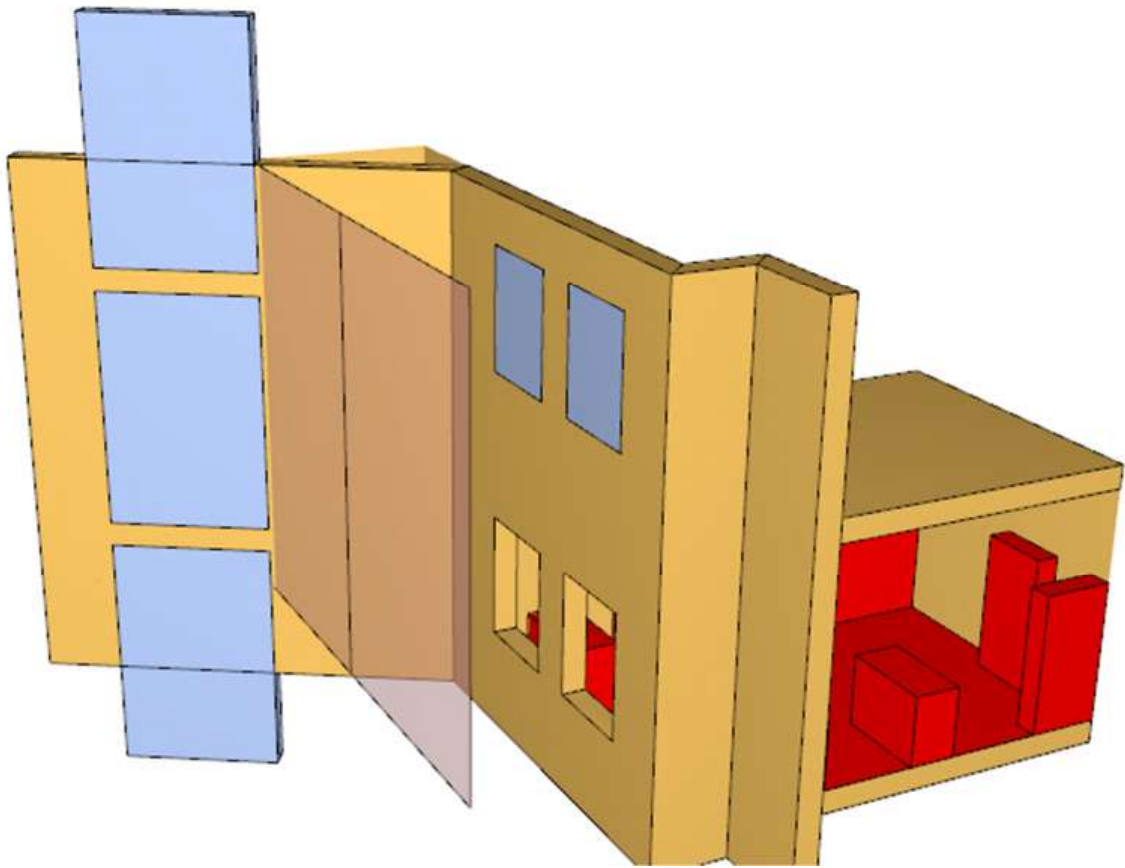


Рисунок 8.4 – Плоскость измерения температуры воздуха параллельно фасаду у помещения очага пожара

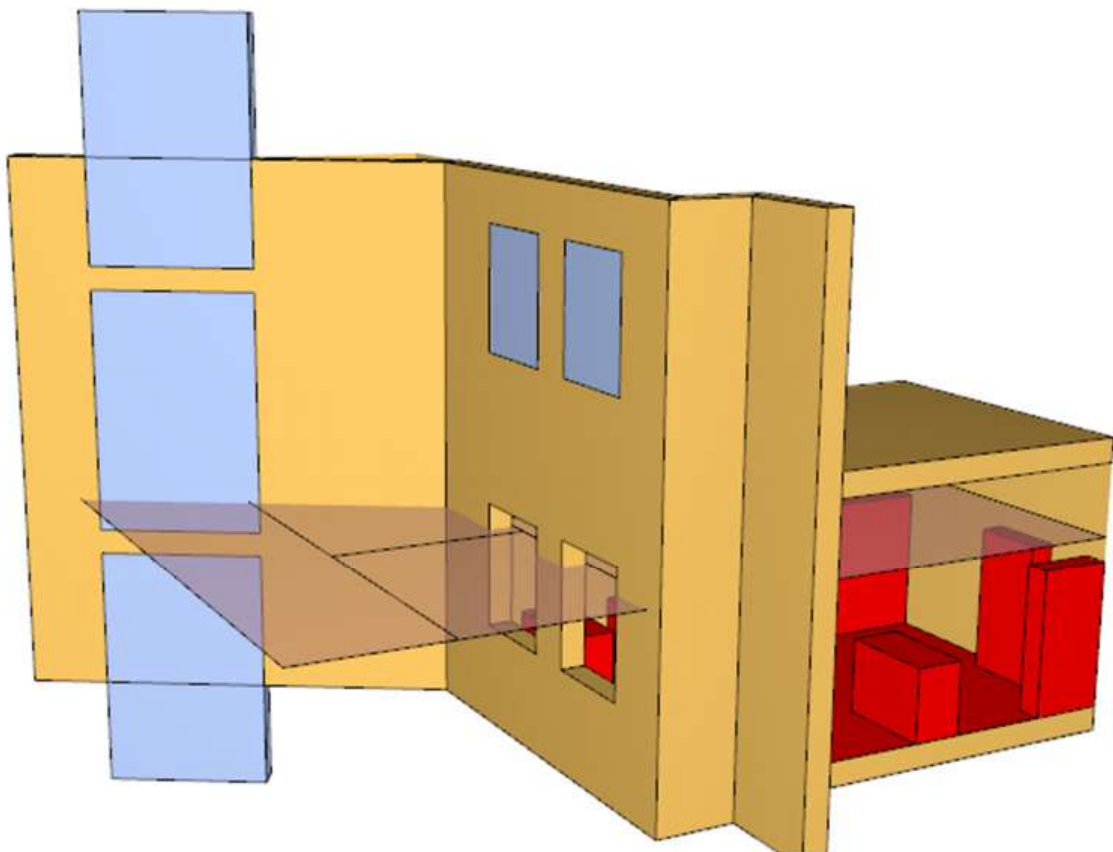


Рисунок 8.5 – Плоскость измерения направления и скорости ветра

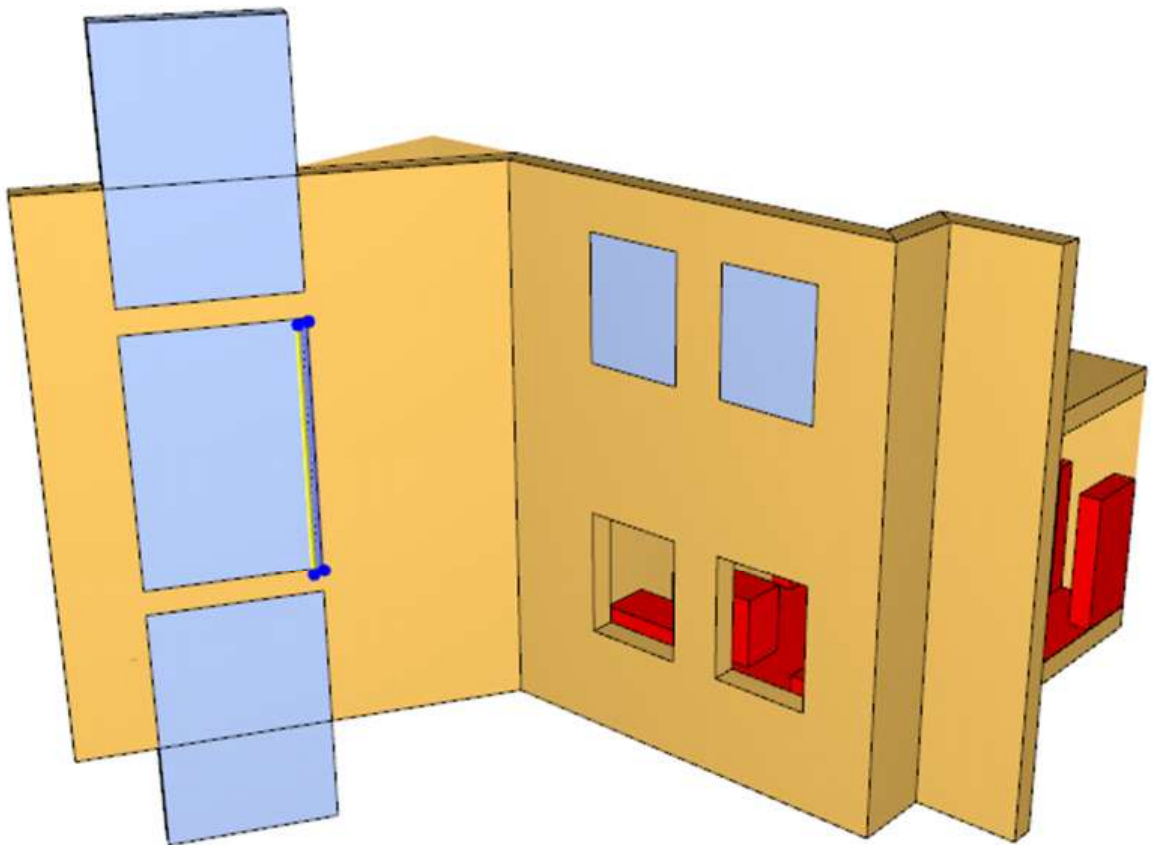


Рисунок 8.6 – Зона измерения теплового потока и температуры стекла

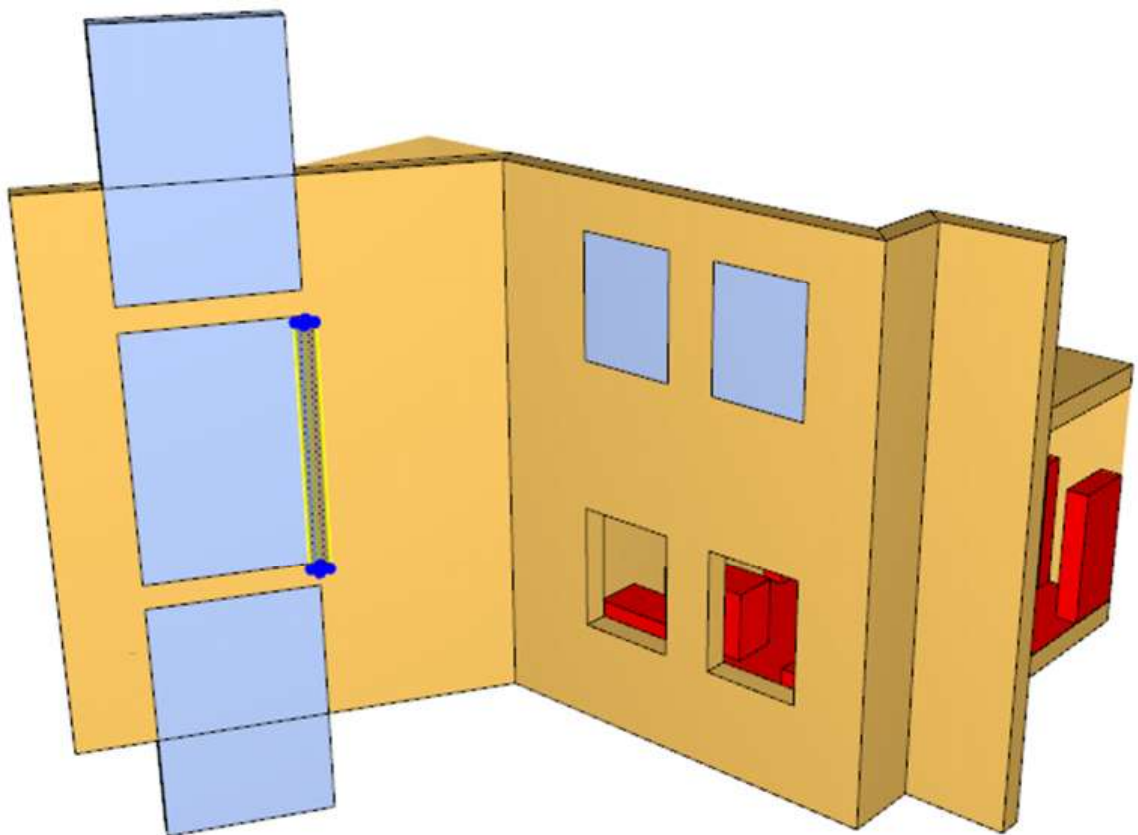


Рисунок 8.7 – Зона измерения температуры воздуха
вблизи поверхности стекла

8.3. Результаты моделирования

Результаты математического моделирования рассматриваемого сценария пожара показывают, что площадь горения, равная удвоенной площади помещения, полностью охватывается пламенем за 663 с. Оба оконных проема приняты открытыми с начала пожара.

Мощность тепловыделения пожара достигает 7 МВт (рисунки 8.8, 8.9).

Температура газовой среды в помещении очага пожара достигает 300 °С, снаружи здания – до 550 °С. В плоскости, параллельной фасаду помещения очага пожара у ближнего края проема лестничной клетки – до 300 °С (рисунки 8.10, 8.11).

Ветер со скоростью 3,8 м/с направлен вдоль фасада помещения очага пожара – таким образом, чтобы максимальное тепловое воздействие оказывалось на остекление лестничной клетки (рисунки 8.12, 8.13).

Дым и продукты горения под действием ветра распространяются в сторону лестничной клетки (рисунок 8.14).

Максимальный тепловой поток, падающий на поверхность остекления лестничной клетки не превышает 10 кВт/м² (рисунки 8.15, 8.16).

Температура поверхности стекла лестничной клетки за время 15 минут не достигает значения 300 °С; максимальная температура составляет 220 °С (рисунки 8.17, 8.18).

Максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла лестничной клетки составляет 216 °С и также не превышает критическое значение 600 °С (рисунок 8.19).

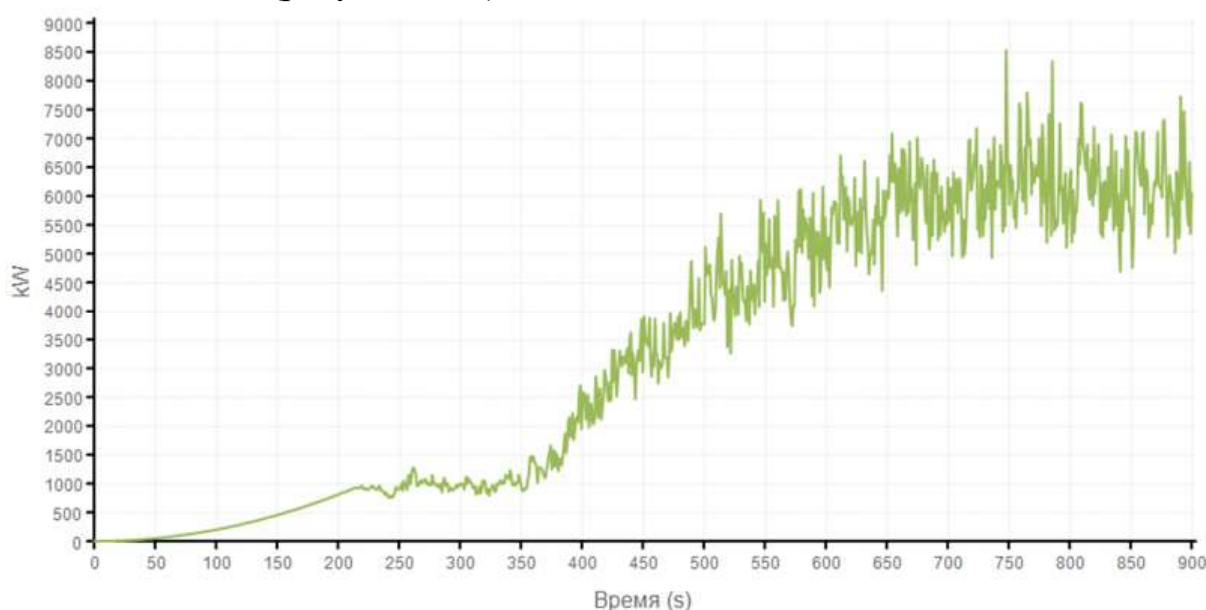


Рисунок 8.8 – Мощность тепловыделения очага пожара

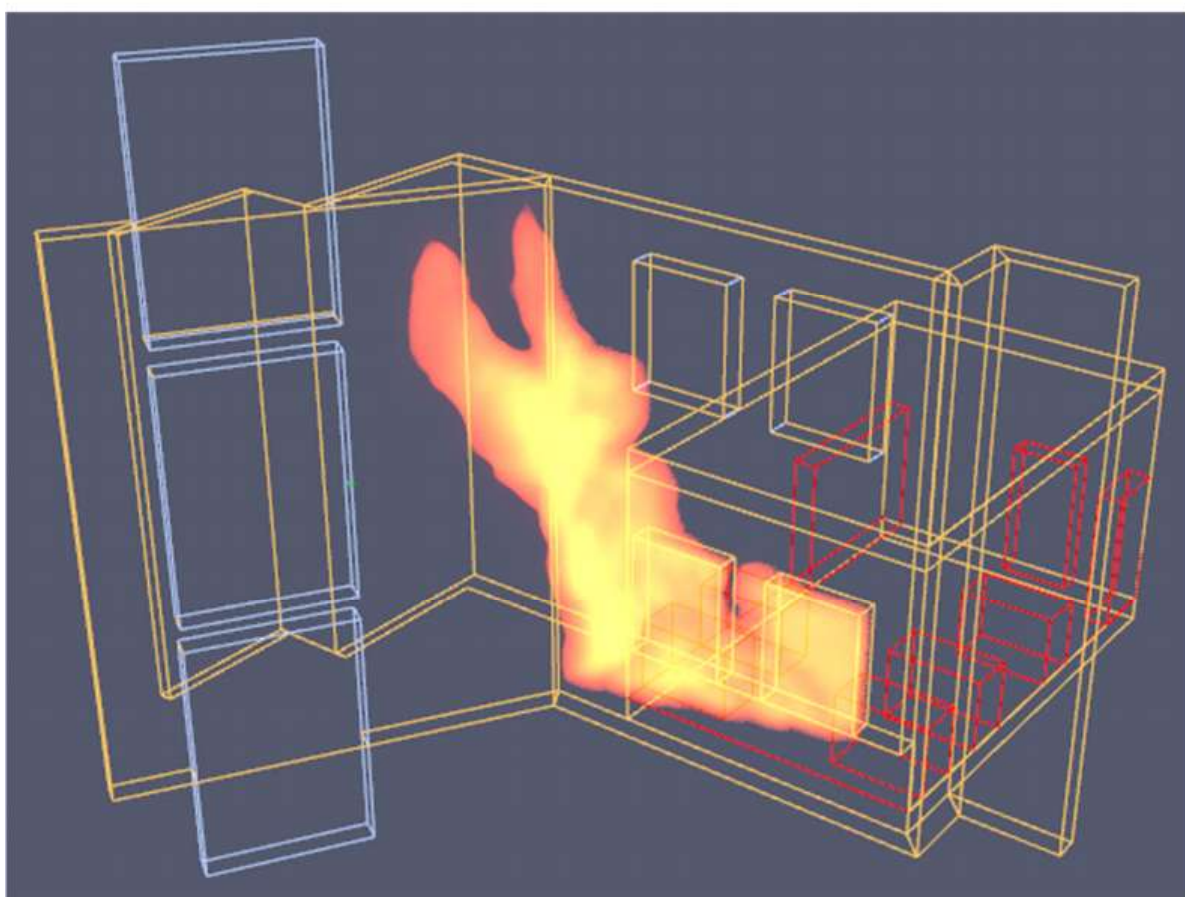
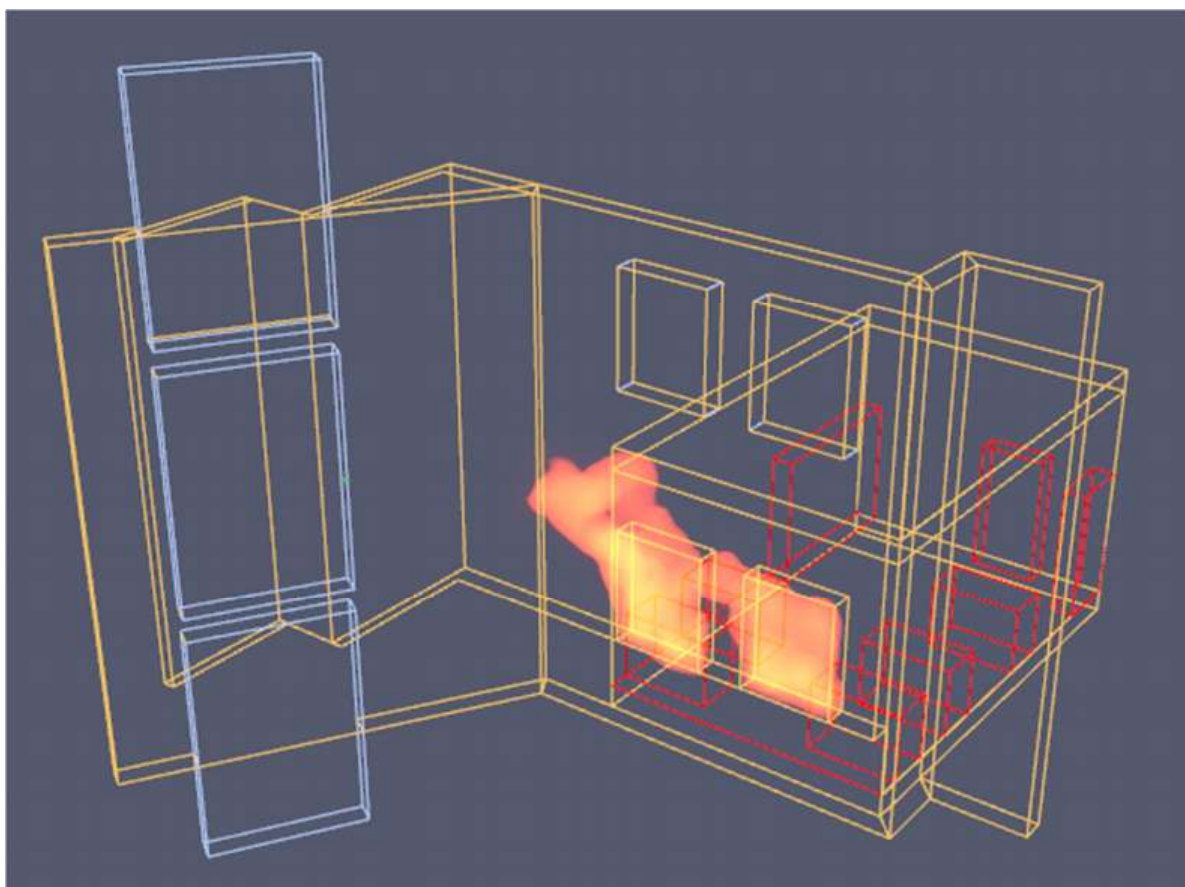


Рисунок 8.9 – Тепловыделение в различные моменты времени

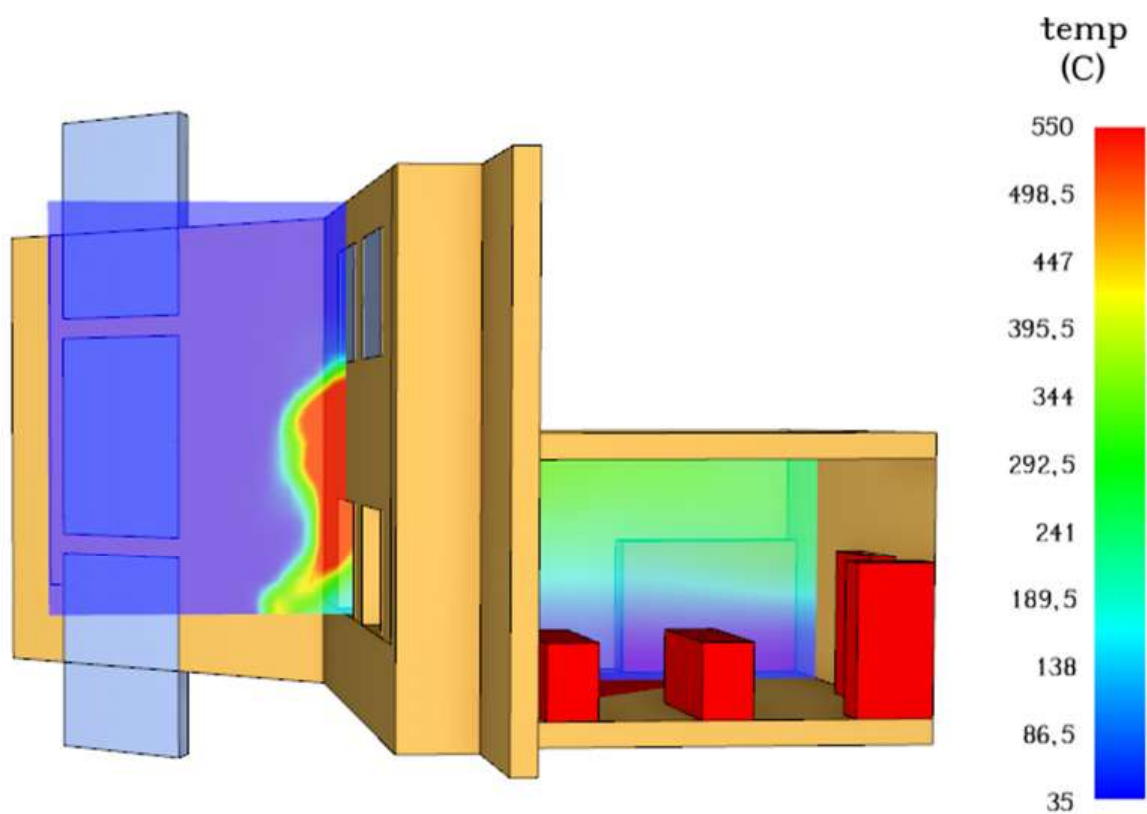


Рисунок 8.10 – Температура воздуха вдоль оси помещения очага пожара

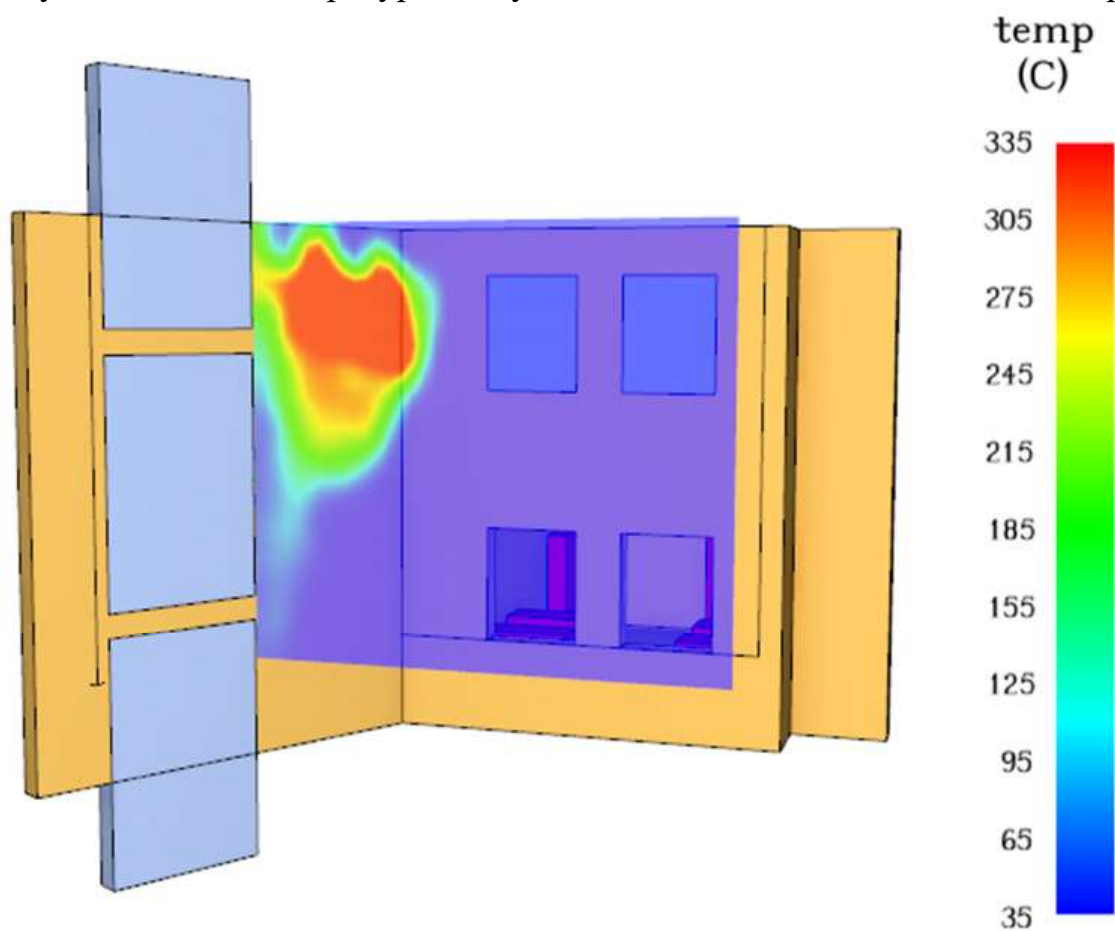


Рисунок 8.11 – Температура воздуха в плоскости, параллельной фасаду помещения очага пожара

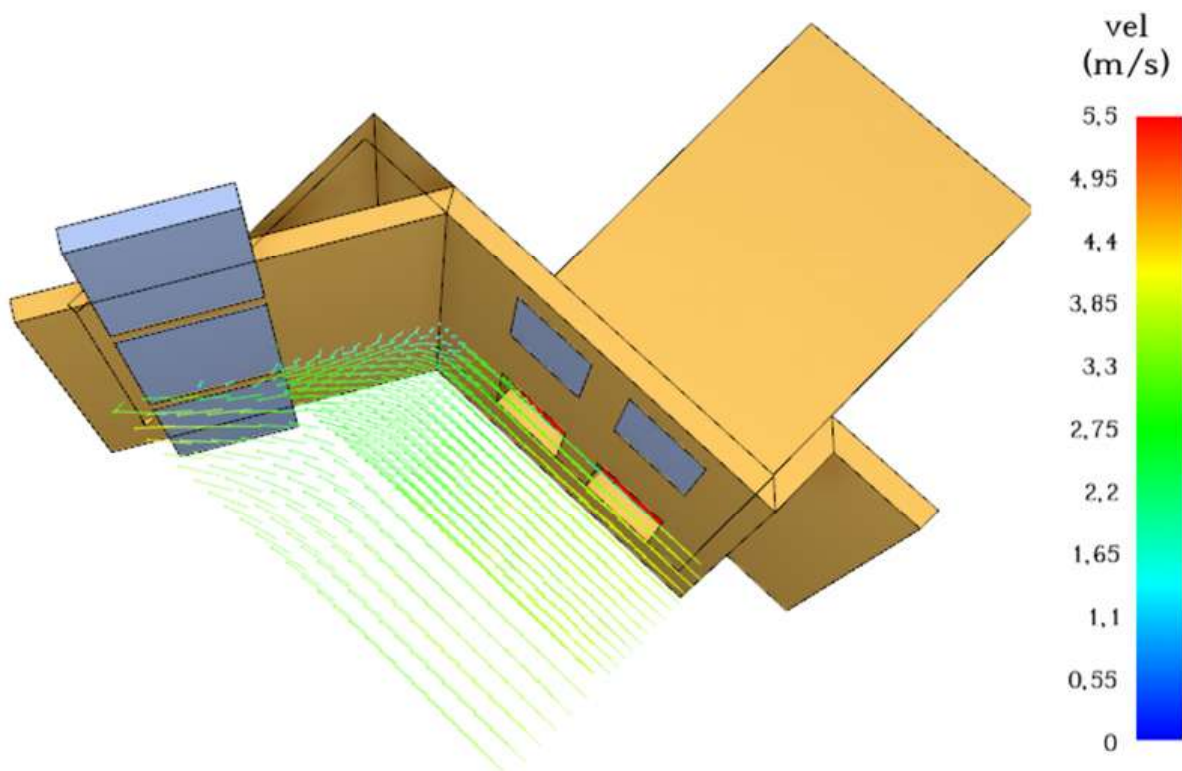


Рисунок 8.12 – Направление и скорость движения воздуха в начальный момент времени

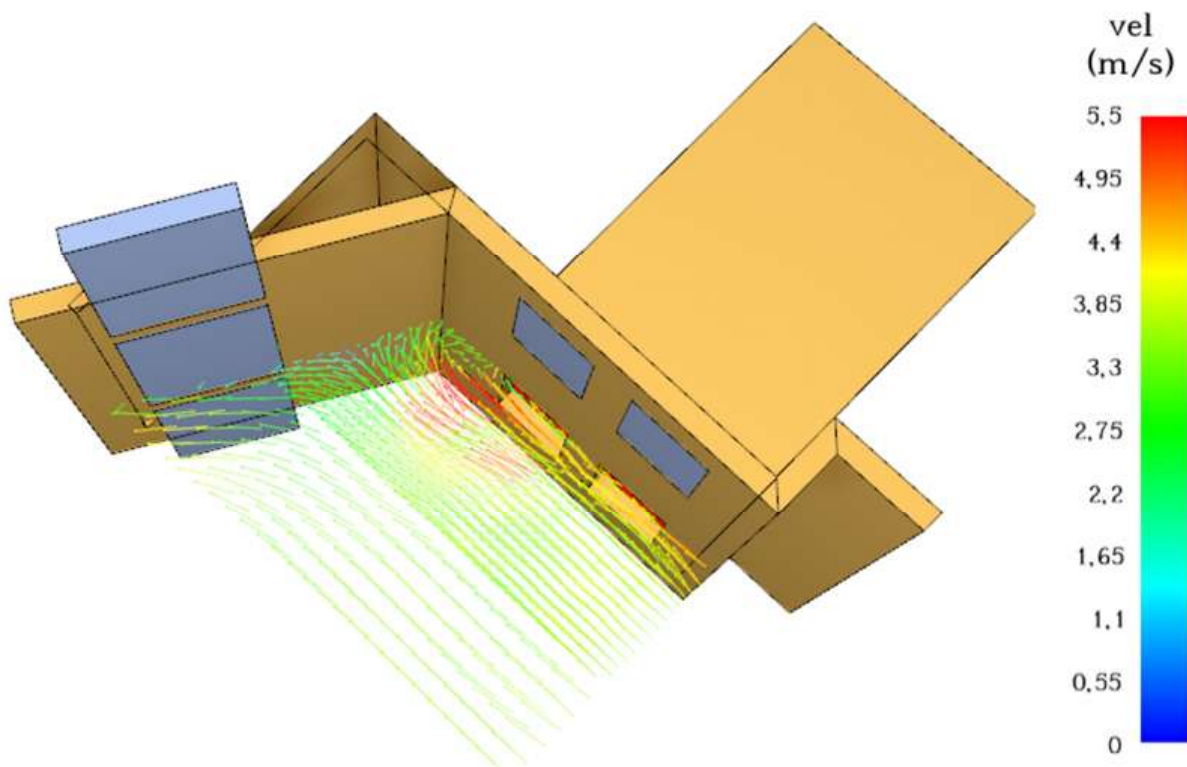


Рисунок 8.13 – Направление и скорость движения воздуха в развитой стадии пожара

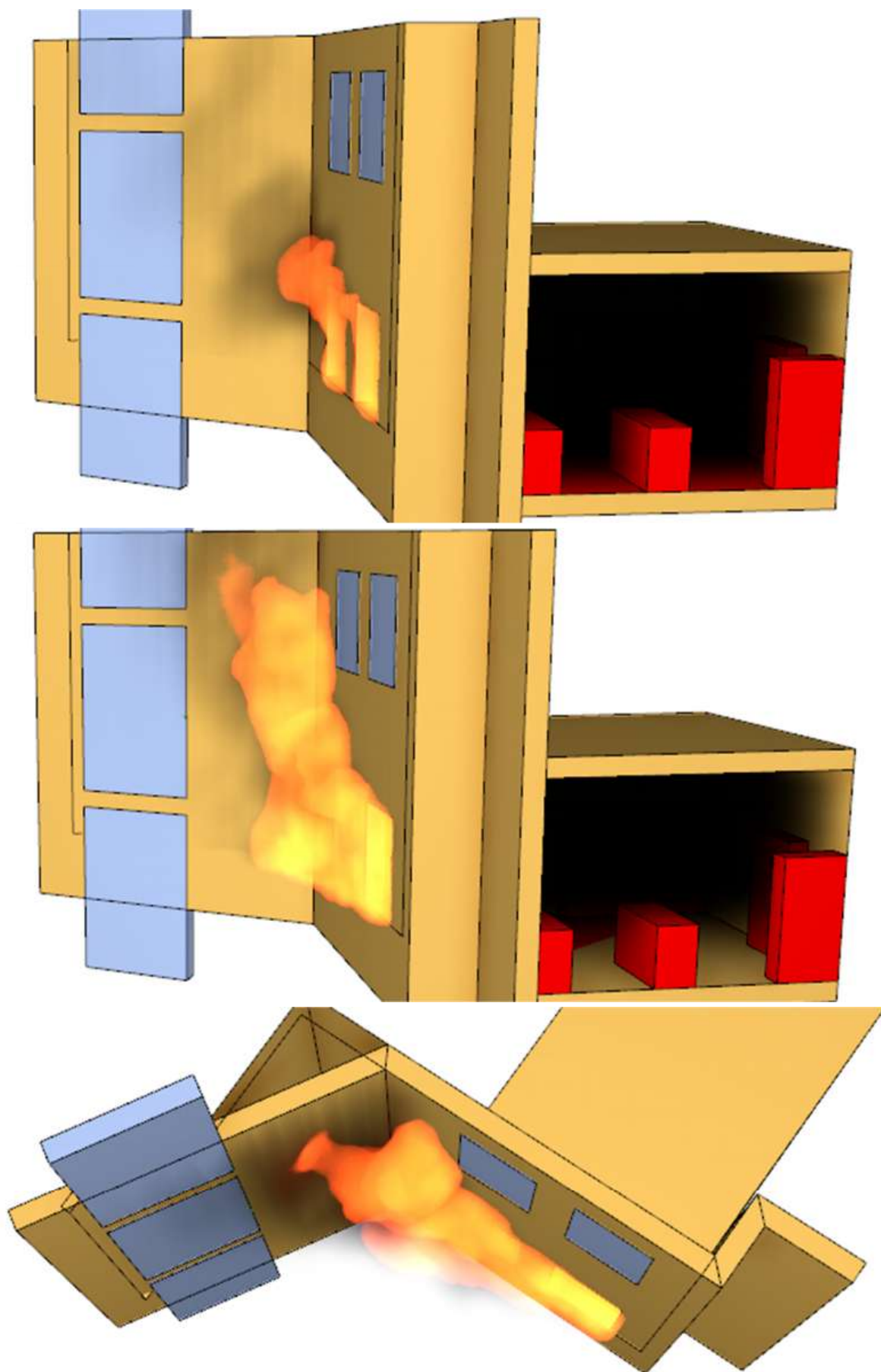


Рисунок 8.14 – Распространение дыма и продуктов горения в различные моменты времени

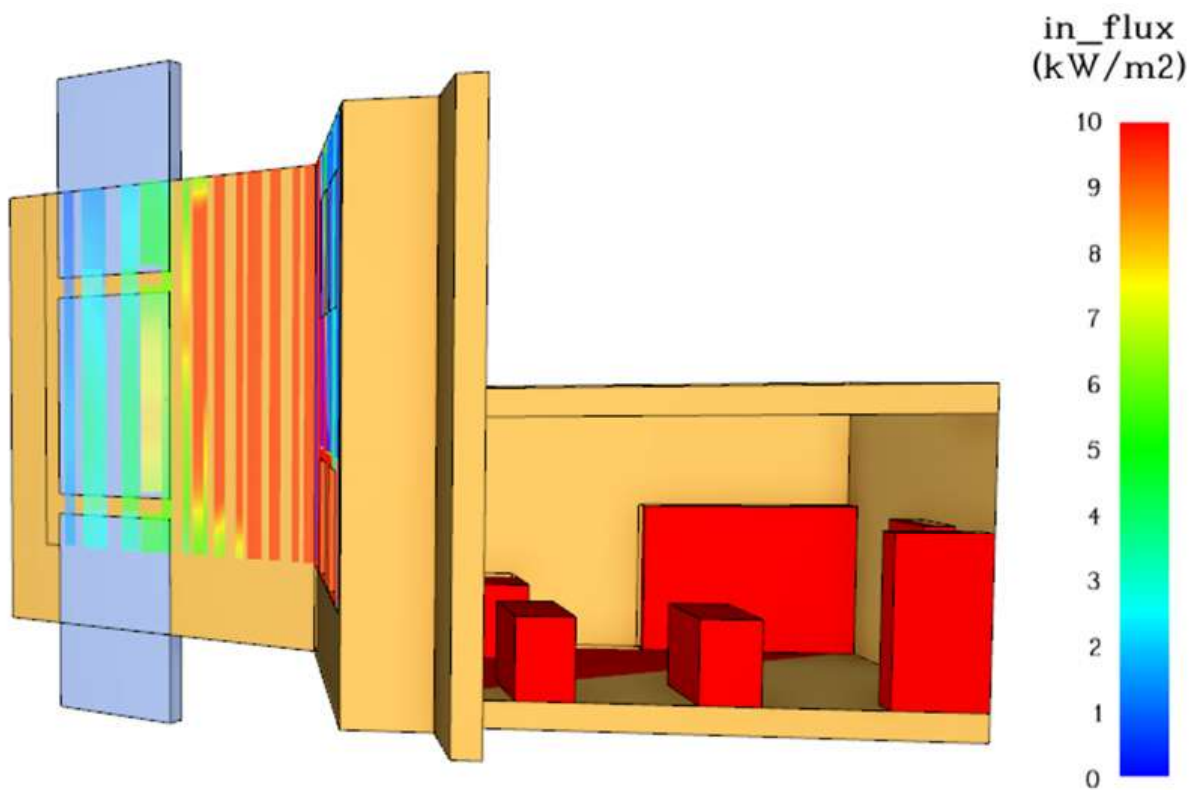


Рисунок 8.15 – Тепловой поток на поверхность остекления
лестничной клетки

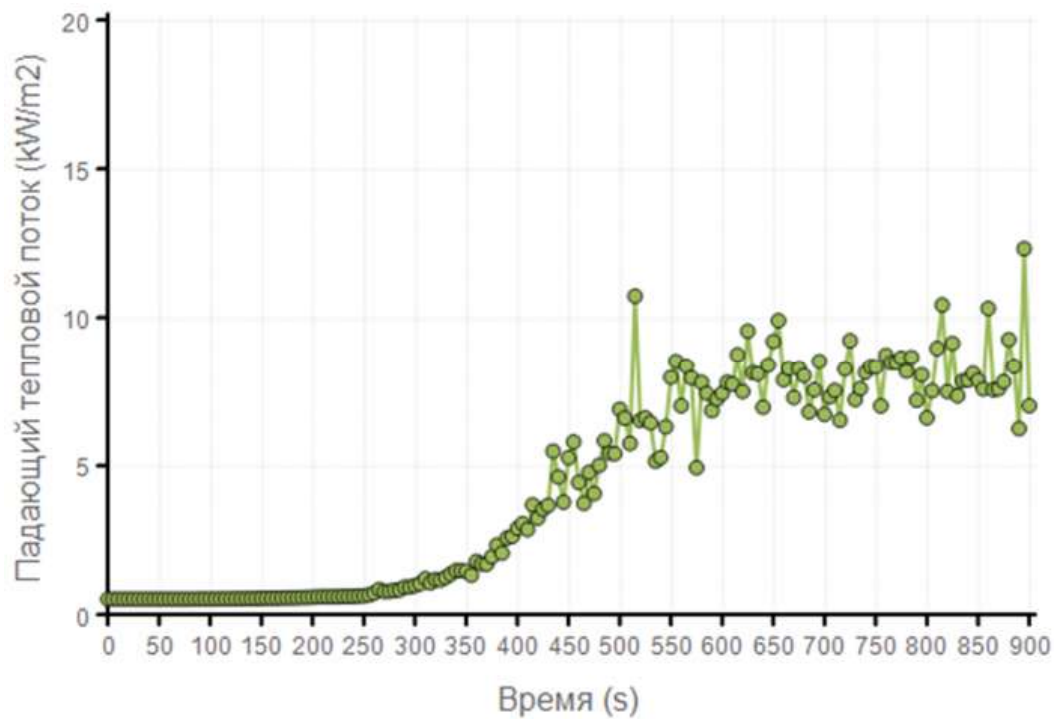


Рисунок 8.16 – Максимальный тепловой поток на поверхность остекления
лестничной клетки

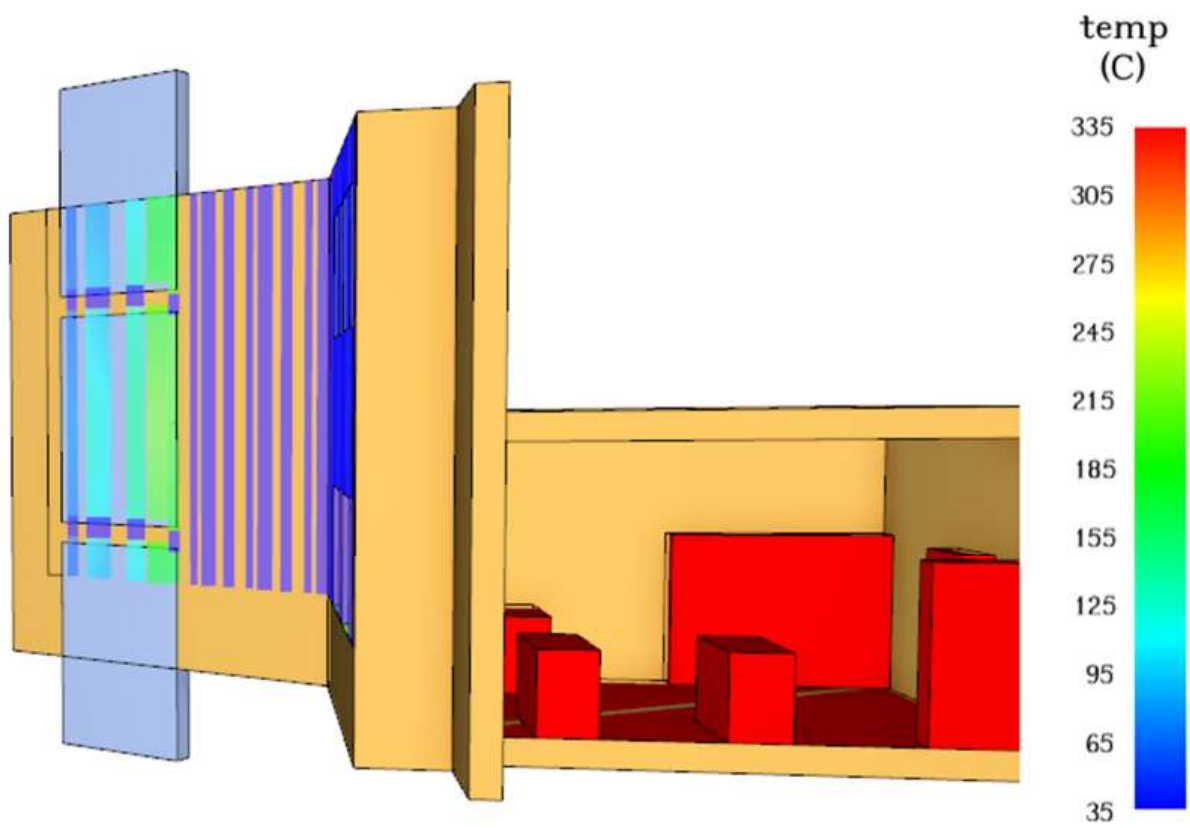


Рисунок 8.17 – Температура поверхности стекла

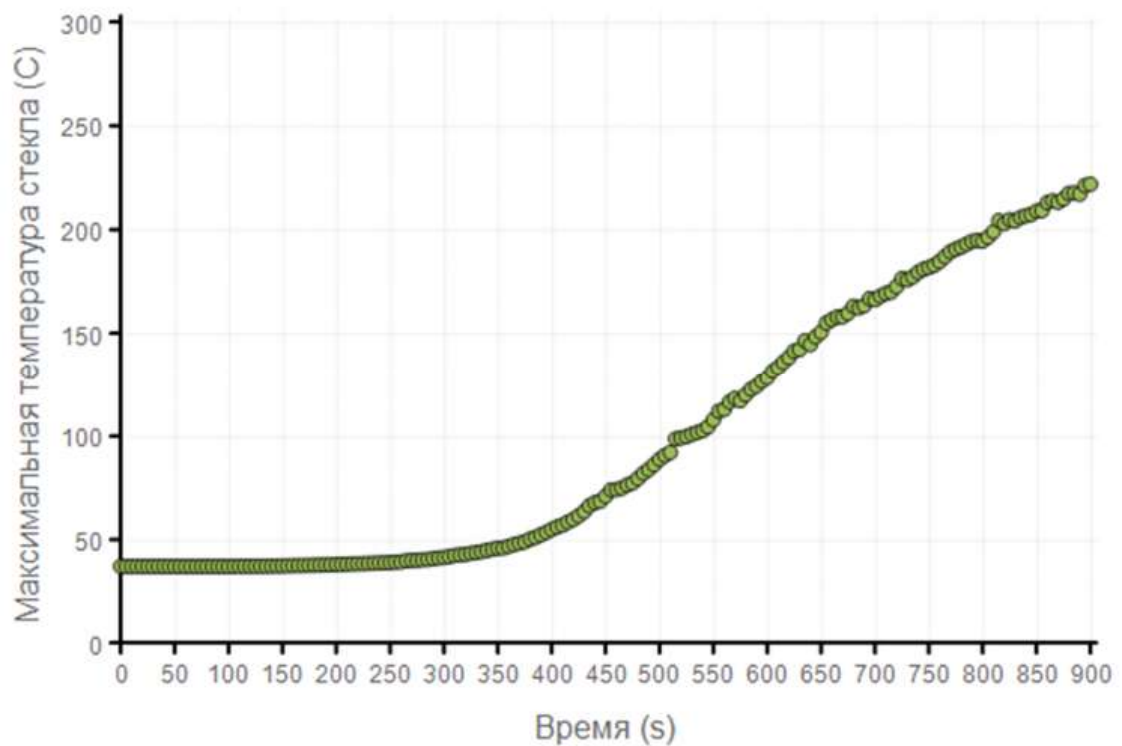


Рисунок 8.18 – Максимальная температура поверхности остекления лестничной клетки

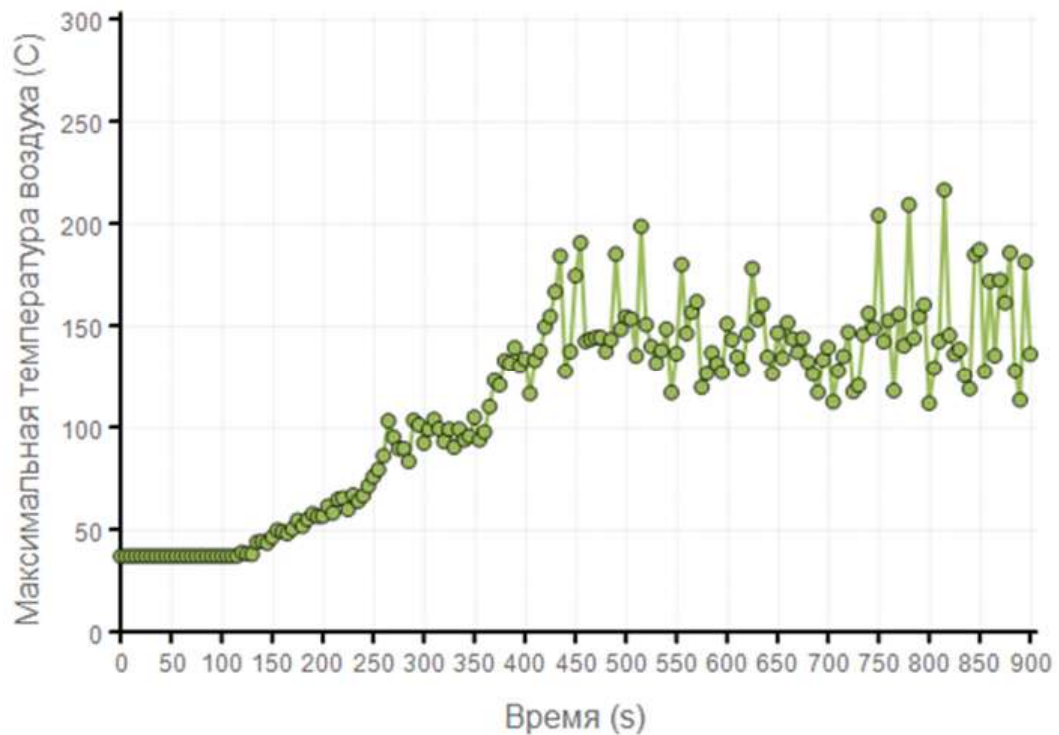


Рисунок 8.19 – Максимальная температура воздуха вблизи поверхности остекления лестничной клетки

8.4. Вывод

Результаты моделирования позволяют заключить следующее.

Плотность теплового потока, падающего на поверхность остекления лестничной клетки в течение 15 минут не достигает критического значения 25 кВт/м^2 .

Максимальная температура стекла не превышает критическое значение $300 \text{ }^\circ\text{C}$, а максимальная температура воздуха вблизи поверхности стекла не превышает критическое значение $600 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы – изучение динамики опасных факторов возможного пожара и определение достаточности высоты междуэтажных поясов 0,75 м здания ... по условию сохранения целостности остекления вышележащих этажей.

В качестве характерного помещения очага пожара принято помещение 2.7 (кабинет), имеющее остекление по всей ширине помещения. Дверь в помещение очага пожара принята закрытой в течение всего времени моделирования. Одна фрамуга окна принята полностью открытой с первых секунд пожара, затем, при достижении среднеобъемной температуры воздуха в помещении 300 °С, моделируется полное разрушение остекления в помещении по всей площади.

Начальная температура ограждающих конструкций и, в частности, остекления соответствует максимальной температуре воздуха в рассматриваемой климатической зоне +36 °С.

Скорость ветра в расчете принята максимальной из средних скоростей ветра по направлениям, которая составляет 4 м/с, направление – перпендикулярно на фасад здания.

Согласно результатам моделирования:

- плотность теплового потока, падающего на поверхность остекления помещений вышележащих этажей в течение 15 минут не достигает критического значения 25 кВт/м²;

- максимальная температура стекла окон помещений, расположенных над очагом пожара, не превышает критическое значение 300 °С в течение 15 минут.

Вышеуказанное позволяет сделать вывод о том, что факторы, приводящие к разрушению остекления, при возможном пожаре не достигают критических значений в течение времени, необходимого для эвакуации людей, а также для прибытия пожарных подразделений (не более 10 минут) и организации действий по тушению пожара, следовательно, **высота междуэтажных поясов 0,75 м – достаточна для выполнения условия нераспространения пожара на вышележащие этажи.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99*.
2. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика.
3. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition.– 2015.
4. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition.– 2015.
5. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности (утв. приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140).
6. А.А. Абашкин, А.В. Карпов, Д.В. Ушаков, М.В. Фомин, А.Н. Гилетич, П.М. Комков, Д.А. Самошин / 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.

Приложение 1. Регистрационное свидетельство и сертификат соответствия программного обеспечения

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И
ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
"ВСЕРОССИЙСКИЙ ОРДЕНА "ЗНАК ПОЧЕТА" НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ"

ФОНД АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН МЧС РОССИИ В ОБЛАСТИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (ФАП ПБ)

РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 02.0004.01

от 21 ноября 2018 г.

Настоящее свидетельство выдано ИП Карькину И.Н. в том, что
представленный в ФАП ПБ

программный комплекс FireCat в составе:
PyroSim, Pathfinder, FireRisk, FireCategories, PromRisk

зарегистрирован за № 02.0004.01

Начальник
ФГБУ ВНИИПО МЧС России
полковник внутренней службы

Д.М. Гордиенко

2018 г.



СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС RU C-RU.HB63.H00489

Срок действия с 18.11.2021 по 17.11.2024

№ 0494627

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ Общество с ограниченной ответственностью "НИЦ ТЕСТ", Место нахождения: 108801, город Москва, п Коммунарка, ул Потаповская Роща, д. 12 к. 2, этаж/пом подв./4 офис 14, Телефон: +79034451952, Адрес электронной почты: openkarosm@yandex.ru, Аттестат аккредитации регистрационный № RA.RU.11HB63.
Дата регистрации аттестата аккредитации: 15.01.2020 года

ПРОДУКЦИЯ Программный комплекс FireCat: PyroSim, Pathfinder, FireRisk, FireCategories, PromRisk, FireDistance
Серийный выпуск

код ОК
034-2014 62.01.29

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000, ГОСТ Р ИСО 9127-94, ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 "Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности" (утвержденной приказом МЧС России №382 от 30.09.2009, с учетом изменений, вносимых в методику приказом МЧС России №749 от 12.12.2011 и приказом МЧС России №632 от 02.12.2015), «Методика определения расчетных величин пожарного риска на промышленных объектах» (утвержденной приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009) СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям» (с изм., утв. приказом МЧС России от 14.02.2020 г. № 89), СП 12.13130.2009 "Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности"

код ТН ВЭД

ИЗГОТОВИТЕЛЬ Индивидуальный предприниматель Карькин Илья Николаевич
Адрес: 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Первомайская 66 – 4
ОГРН: 310667016000056, Телефон: (343) 319-12-62; Адрес электронной почты: mail@pyrosim.ru

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН Индивидуальный предприниматель Карькин Илья Николаевич
Адрес: 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Первомайская 66 – 4
ОГРН: 310667016000056, Телефон: (343) 319-12-62; Адрес электронной почты: mail@pyrosim.ru

НА ОСНОВАНИИ Протокола испытаний № 32311.ИЛ01.СС0878 от 18.11.2021 года. Испытательной лаборатории Общество с ограниченной ответственностью «АРТАЛИКС», Свидетельство об уполномочивании № ARTALIX.RU.32311.ИЛ01. Дата регистрации свидетельства: 05.10.2020 года.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Схема сертификации 3



Руководитель органа

Эксперт

[Signature]
подпись
[Signature]
подпись

Н. Ю. Бизюкова

инициалы, фамилия

С. А. Заикин

инициалы, фамилия

Сертификат не применяется при обязательной сертификации