

**Уральский Институт ГПС МЧС России**  
**Материалы учебного семинара**  
**«РАСЧЕТ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ**  
**ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ»**  
**Екатеринбург 19-21 мая 2009 года**

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ CFAST (СИТИС: БЛОК 2) ДЛЯ ЗОННОЙ МОДЕЛИ**



**Карькин Илья Николаевич**

*Директор ООО «Ситис»,  
кандидат физико-математических наук*

Мой доклад посвящен новой версии программы «СИТИС: Блок», это **версия 2.0**, которая в своей основе использует двухзонную модель **CFAST**. Вначале я расскажу о том, что это за модель, а потом покажу, как она реализована в рамках нашей программы СИТИС: Блок 2.

**CFAST**

Во-первых, программа и модель CFAST, разработана Национальным институтом стандартов и технологий США.

То есть, это та же организация, которая разрабатывает и поддерживает Fire Dynamic Simulator (FDS), реализующий полевую модель.

Модель CFAST предназначена для расчета по двухзонной модели, реализует двухзонную модель расчета тепломассопереноса при пожаре, позволяет прогнозировать параметры распространения продуктов горения и их распространение по зданию.

Если говорить про процесс разработки программного обеспечения, то, я считаю, что непосредственно сам разработчик, в первую очередь, должен предоставить документы, в которых описаны валидация и верификация расчетной модели, если речь идет о программном обеспечении, реализующем эту модель.

Кто-то с этими может не согласиться, но в первую очередь, он должен не только разработать, но и показать, насколько его модель соответствует тем процессам, которые она описывает, и с экспериментальной и с качественной точки зрения. В данном случае, мы делаем аналогичный шаг.

**Таблица «Соответствие модели методике ВНИИПО»**

Методика ВНИИПО	CFAST
Переменные для основных уравнений могут быть выбраны различным образом, при этом суть уравнений не меняется.	
В методике ВНИИПО в качестве независимых переменных выбраны масса верхнего и нижнего слоев и внутренняя энергия верхнего и нижнего слоев.  Для верхнего слоя: $\frac{dm}{dt} = G_K - G_H$ $\frac{dQ}{dt} = Q_K - Q_H - Q_{кон}$  Для нижнего слоя (предполагается, что параметры нижнего слоя остаются неизменными во время пожара): $\frac{dm}{dt} = 0$ $\frac{dQ}{dt} = 0$	В CFAST независимыми переменными выбраны давление, объем верхнего слоя и температура верхнего и нижнего слоев.  $\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_V)$ $\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[ (\gamma - 1) \dot{h}_V - V_U \frac{dP}{dt} \right]$ $\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_V V_U} \left[ (\dot{h}_V - c_p \dot{m}_V T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right]$ $\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[ (\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right]$
Различие в выборе переменных имеет значение только для построения модели. На результатах расчетов выбор переменных не сказывается.	
<b>Масса отдельных компонентов и количество дыма</b>	
Масса токсичных газов: $\frac{dm_k}{dt} = \psi_k G_K - \chi_k G_H$ Масса кислорода: $\frac{dm_k}{dt} = 0.23(G_K - \eta \psi_k G_K) - \chi_k G_H$ Оптическое количество дыма: $\frac{dS}{dt} = \psi_D - G_H \frac{\mu}{\rho}$	$\frac{d}{dt} m_{НСХ} = source - K_c (\rho_{НСХ} - \rho_{дНСХ}) A_w$ Остальных компонентов рассчитываются аналогичным образом.

Мы показываем насколько модель CFAST двухзонная, соответствует той модели, которая описана в приложении 5, методики ВНИИПО (см.табл.«Соответствие модели методике ВНИИПО»). Здесь проблем никаких не возникает, так как физика процессов тепло-массообмена одна, что в России, что в Америке, поэтому в целом, если посмотреть на формулы, которые приведены в методике ВНИИПО и на те, которые используются при моделировании CFAST, то они единообразны. Не смотря на то, что в CFAST независимая переменная состоит из давления, объема верхнего слоя, температуры верхнего и нижнего слоев. В методике ВНИИПО в качестве независимой переменной выбраны масса верхнего и нижнего слоев,

внутренняя энергия и энергия нижнего слоя. Однако суть уравнения от этого никак не меняется. Различия в выборе переменных имеют значения только для построения модели, на результат расчетов выбор переменных никак не сказывается.

**Таблица «Соответствие модели методике ВНИИПО».**

**Продолжение**

Методика ВНИИПО	CFAST
Источниковые члены в моделях методика ВНИИПО и CFAST рассчитываются одинаково	
<i>Масса компонентов дыма, вносимых в заданную зону конвективной колонкой</i>	
$G_c = \begin{cases} 0.011 \times Q \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{0.585} & \text{для области факела} \\ 0.026 \times Q \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{0.985} & \text{для переходной области} \\ 0.124 \times Q \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{1.315} & \text{для области колонки} \end{cases}$	$m_c = \begin{cases} 0.011 \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{0.585} & \text{для области факела} \\ 0.026 \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{0.985} & \text{для переходной области} \\ 0.124 \left( \frac{Z}{Q^{0.325}} \right)^{1.315} & \text{для области колонки} \end{cases}$
<i>Расход воздуха через вертикальные проемы</i>	
$G_{\pi} = B \cdot \xi \int_{y_{min}}^{y_{max}} \sqrt{2\rho(P(h) - P_2(h))} dh$	$v = C \left[ \frac{2\Delta P}{\rho} \right]^{1/2}$ <p>скорость потока газа через проем  <math>\dot{m}_w = vA_w</math>                      - массовый расход газа через проем</p>
<i>Теплопередача в конструкции</i>	
$\frac{\partial T_1(y)}{\partial t} = \frac{1}{C(T) \cdot \rho} \frac{\partial \lambda(T) \partial T_1(y)}{\partial y^2}$ $(\alpha_x + \alpha_n) \cdot (T_c - T_w) = -\lambda_w \left. \frac{\partial T_1(y)}{\partial y} \right _{y=0}$ $(\alpha_x + \alpha_n) \cdot (T_0 - T_1(\delta)) = -\lambda(T) \left. \frac{\partial T_1(y)}{\partial y} \right _{y=\delta}$	$q'' = -k \frac{dT}{dx}$ <p>передача теплового излучения в конструкцию.  <math>q'' = hA_s(T - T_s)</math>                      - конвективная теплопередача в конструкцию,                      где h рассчитывается через числа Нуссельта <math>Nu</math> и Релея <math>Ra</math>.</p>
<i>Мощность источника</i>	
$Q = \eta \psi H_f S(t)$	В CFAST мощность источника задается пользователем.

Аналогичная ситуация с остальными формулами (см. табл. «Соответствие модели методике ВНИИПО». Продолжение). Вы можете видеть, что источник (...) модели в методике ВНИИПО и CFAST рассчитываются одинаково, на основе метрических зависимостей. И остальные параметры, в принципе, определены подобным образом. Эта информация подробно представлена в документе, который мы выпустили некоторое время назад. Это методика использования двухзонной модели CFAST для расчета. Сейчас эта информация направлена во ВНИИПО. В целом можно считать, что двухзонная модель CFAST, соответствует двухзонной модели. В плане ее реализации, как математической, которая описана в приложении 5 методики.

**Валидация**

Теперь несколько слов о валидации. Это, безусловно, важный этап и (...) CFAST, есть отдельный документ, достаточно объемный. Причем есть документ, описывающий валидацию, сделанный авторами и отдельный документ, разработанный министерством атомной энергетики Америки. Он был создан, когда в министерстве для своих целей рассматривали различные модели динамики развития опасных факторов пожара, проводили их исследования, сравнения с экспериментом и давали оценку.

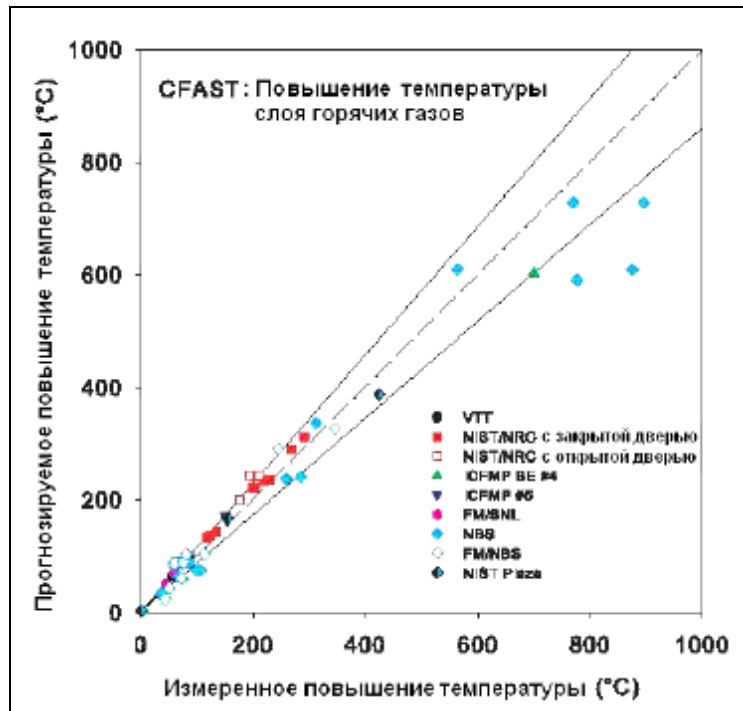
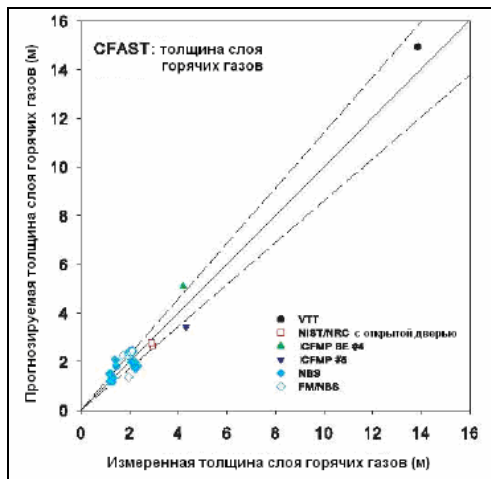
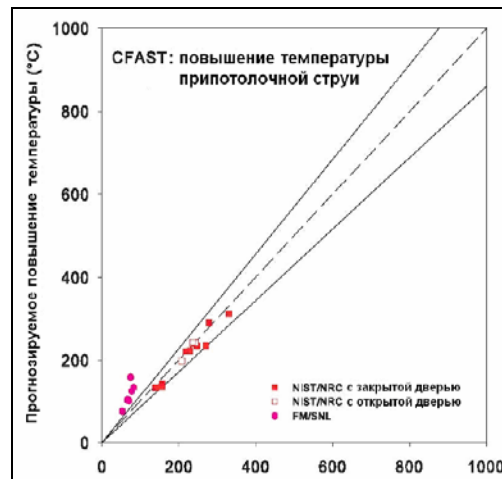


Рис.12.1. Валидация: температура.

На данном рисунке 12.1 представлены результаты для валидации по температуре. Видно, что прогнозы температуры слоя горячих газов обычно слегка завышены, но находятся в пределах 10-20 процентов от экспериментальных. Здесь на всех, представленных дальше, графиках по оси OY будет отложено прогнозируемое повышение температуры с помощью CFAST, по оси OX - измеренное повышение. Для построения анализа каждой из рассмотренных характеристик было использовано достаточно большое количество экспериментов, проведенных в различных научно-исследовательских лабораториях по всему миру. Это достаточно длительная работа, которая была проделана именно для того, чтобы подтвердить, что процессы, описываемые с помощью данной модели, соответствуют действительности с определенной точностью.



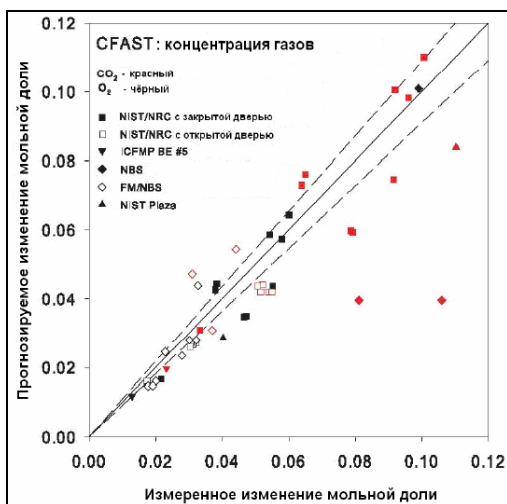
**Рис.12.2.** Валидация:  
толщина слоя горячих газов.



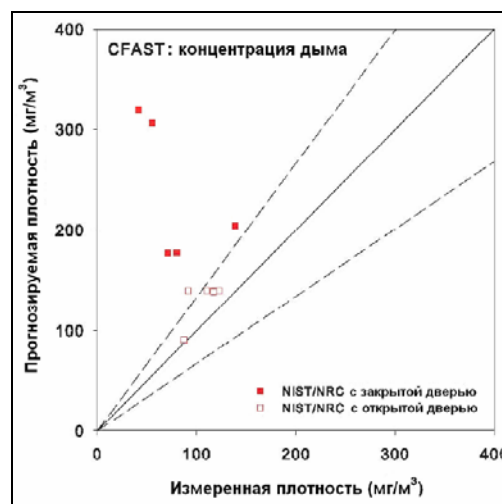
**Рис.12.3.** Валидация:  
температура припотолочной струи.

**Толщина слоя горячих газов** (рис.12.2). Глубина слоя чуть больше экспериментальной, но опять же, в пределах 10-20%.

**Температура припотолочной струи** (рис.12.3). Температура припотолочной струи прогнозируется в пределах экспериментальной погрешности. Есть замечание, что, если температура слоя горячих газов намного ниже 70°C, то есть критического значения, наблюдается значительное завышение прогнозируемых значений.



**Рис.12.4.** Валидация: концентрация газов.



**Рис.12.5.** Валидация: концентрация дыма.

**Концентрация газа** (рис.12.4). Концентрация газа и давление в помещении находятся в пределах экспериментальной погрешности.

**Концентрация дыма** (рис.12.5). Здесь при испытаниях «с открытой дверью» значения концентрации дыма находятся в пределах экспериментальных погрешностей, а в испытаниях «с закрытой» значительно превышают.

### Область использования

В руководстве по CFAST определены следующие моменты:

- оценка динамики развития опасных факторов пожаров в жилых, общественных и промышленных зданиях и сооружениях
- определение параметров противопожарных систем

### Параметры исходных данных

#### Помещения

- помещения должны быть простой геометрической конфигурации
- помещения должны представляться прямоугольными призмами с соизмеримыми размерами
  - в помещениях не должно быть выступающих частей, препятствующих движению дымового слоя под потолком
  - размеры помещений должны быть соизмеримыми
  - при длине помещения более 5 ширин используются экспериментальные зависимости распространения дымового слоя по коридорам. То есть, в модели заложено, что если мы выходим за

рамки ее определения (чисто двухзонной модели), включаются в работу известные, тоже уже хорошо отработанные, другие экспериментальные зависимости.

- при высоте помещения более 6 размеров ширины, например для лестничных клеток и лифтов, используются экспериментальные зависимости для шахт

### **Мощность пожара**

- При расчете пожаров, мощность которых больше, чем 1 МВт/ м<sup>3</sup> помещения пожара, отсутствуют экспериментальные данные о достоверности результатов расчета. Сразу скажу, что на практике это нереальная ситуация, то есть это очень большая мощность.

- При расчете пожаров небольшой мощности может не формироваться дымовой слой, описываемый зонной моделью.

### **Проемность**

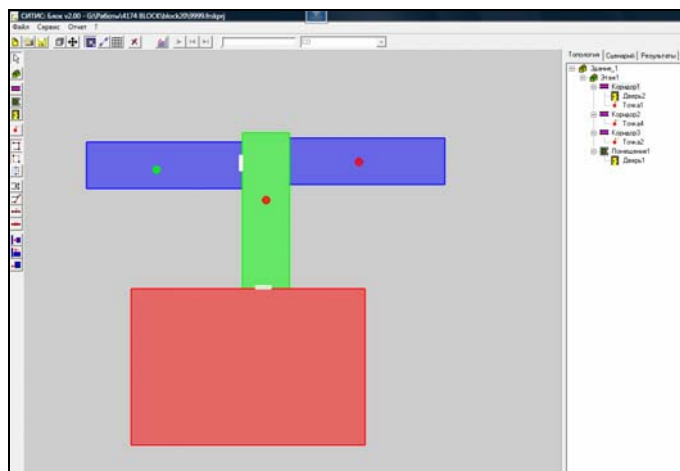
Также есть ограничения на проемность, то есть для каждого отдельного помещения соотношение площади проемов между помещениями и проемов естественной вентиляции к объему помещения не должно превышать 2м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

### **Подсосы и перетоки**

Возможен учет перетоков при пожаре через неплотности дверных и оконных проемов, систем вентиляции. Модель позволяет задавать такие исходные данные.

## **СFAST в СИТИС: Блок2**

Теперь перейдем к реализации этой модели в программе «СИТИС: Блок2». Как я уже говорил, мы решили объединить все наши программы в единый комплекс. Сейчас существует возможность задания топологии зданий, как в программе «Блок», так и в программе «Флоутек». И в дальнейшем можно, по существующей топологии, созданной в той или иной программе, сделать расчетный сценарий. То есть, когда топология создана или открыта уже существующая, мы можем перейти к построению сценария.



**Рис.12.6.** СИТИС: Блок 2. Создание топологии.

Добавляем новый сценарий, по аналогии с «Флоутеком». Добавляем в него этаж, на этаже добавляем нужные помещения, коридоры. Например, была создана вот такая структура (рис.12.6), состоящая из одного помещения, трех коридоров, двух дверей, и поставлены две расчетные точки, в которых будут рассчитаны значения времени блокирования. Был создан сценарий, в котором, кроме всего прочего, есть двери. Двери можно задать открытые или закрытые. В зависимости от этого меняется сценарий, опасные факторы пожара будут или не будут проходить через эту дверь дальше.

Мы можем построить два разных сценария на основе одной и той же топологии, изменив место пожара. В первом сценарии поверхность горения или источник пожара находятся в помещении №1, а во втором сценарии, созданном на основе той же самой топологии, поверхность горения мы расположили в коридоре. Это демонстрация того, что мы, имея одну и ту же модель здания, можем строить абсолютно бесконечное количество различных расчетных сценариев, располагая в том или ином помещении разную нагрузку, задавая разные свойства, меняя ее характеристики.

### **Характеристики**

Если говорить про геометрию, то здесь все понятно. Это контуры, координаты вершин каждого из углов коридора, его длина, ширина. Есть свои характеристики для двери. У пожарной нагрузки есть целый стандартный набор различных свойств, которые можно взять из базы данных Кошмарова.

Основное отличие «СИТИС: Блок2» от программы «СИТИС: Блок 1», в том, что здесь появилась возможность задавать площадь пожарной нагрузки. Соответственно, она учитывается в расчете. Мы можем выбрать из известной базы данных, например, типовую горючую нагрузку здания второй степени огнестойкости, и в расчет будут заданы соответствующие параметры.

### **Моделирование процесса горения и источника пожара**

Сейчас, существует, как описано в Методике, три модели распространения горения – *круговая*, *линейная*. Наиболее часто применяемая – это все-таки *круговое распространение пожара*. В этом случае зависимость скорости тепловыделения от времени выглядит следующим образом (рис.12.7).

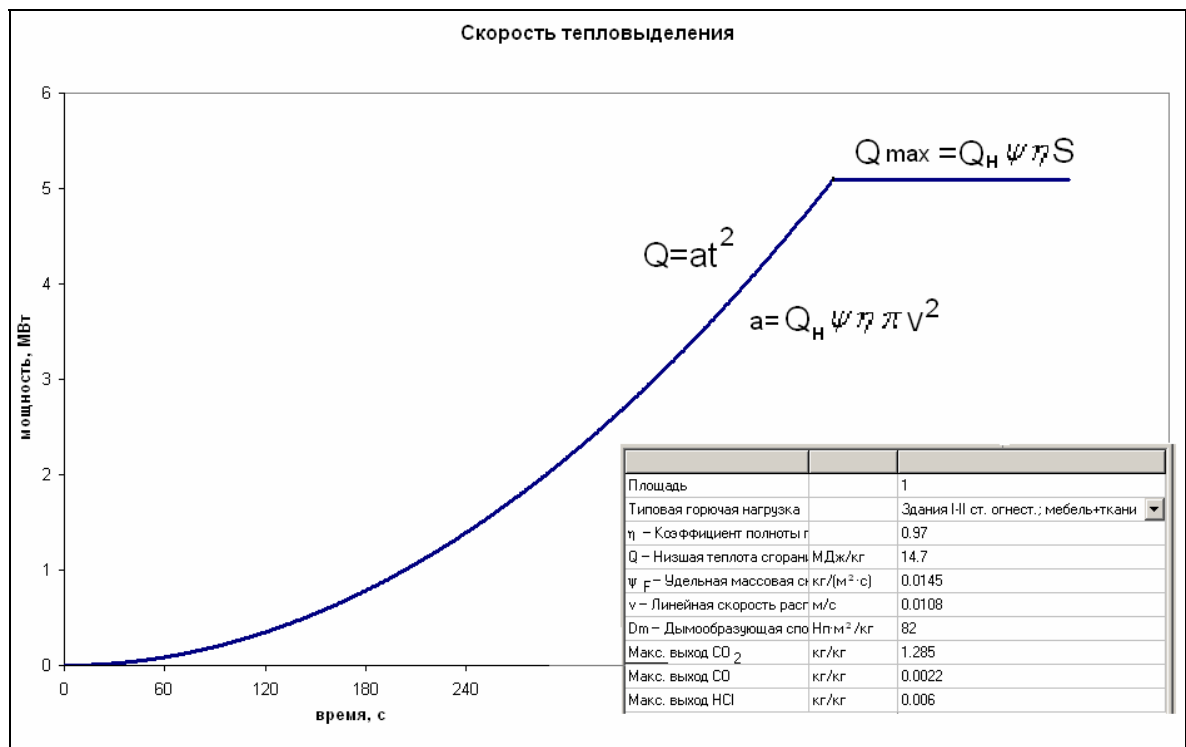


Рис.12.7. Скорость тепловыделения.

То есть это квадратичное развитие пожара.

#### Параметры для источника пожара

Несколько слов о тех параметрах, которые можно задавать для источника пожара и что они значат.

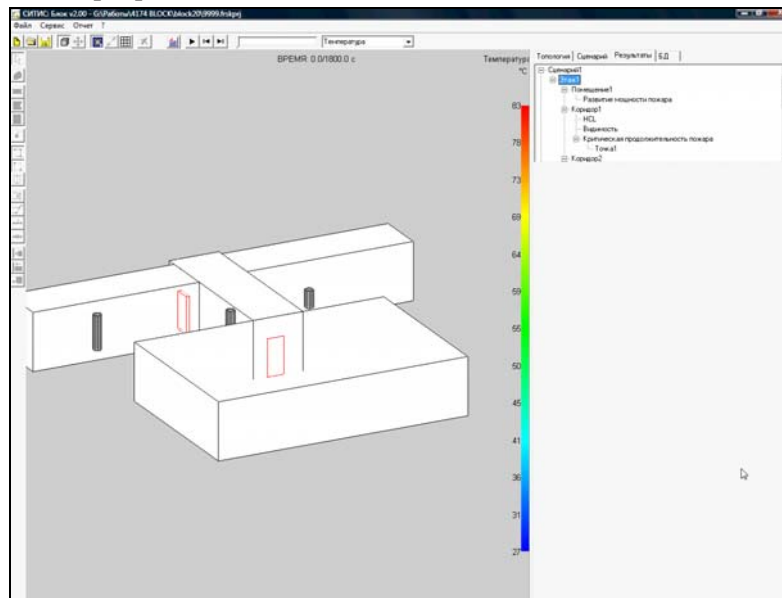
**Максимальная мощность пожара** – это то, до какой степени может развиваться данный пожар.

Она определяется следующими параметрами:

- *низшая теплота сгорания*, то есть, какое количество энергии может выделить единица массы горючего вещества.
- *удельная массовая скорость выгорания*, то есть это уже какая масса вещества, с единицы площади, сгорает в единицу времени.
- *площадь* –  $S$ , пожарной нагрузки и коэффициент полноты сгорания.

С помощью этих параметров определяется максимальное значение мощности, а скорость достижения этого максимального значения, определяется линейной скоростью распространения. Вот  $V$  квадрат. И все те же самые параметры. Еще нужно учитывать дымообразующую способность: сколько, сажи образовалось с единицы площади при сгорании единицы массы вещества. Дымообразующая способность, в частности, влияет на видимость. Я рассказываю об этом для того, чтобы вы могли понимать, чем качественно будет отличаться результат моделирования, если вы измените тот или иной параметр.

Теперь, что же можно сделать, после того, как мы создали сценарии и запустили их на расчет в программе «СИТИС-Блок2». Вы видите, здесь, также как во «Флоутек», и других наших программах,



существует возможность 2D, и 3D просмотра сценария.

Точно также можно посмотреть графики зависимости критической продолжительности пожара по каждому из параметров (видимость, изменения кислорода, температура и так далее). То есть изменения в зависимости от времени. И можно визуализировать процесс изменения параметров верхнего слоя и нижнего (рис.12.8). В данном случае визуализируется, когда пожар

Рис.12.8. СИТИС: Блок 2. Результаты и визуализация.



происходит в коридоре. Можно посмотреть температуру, затем переключиться на другой сценарий. Картинка меняется, потому что источник пожара, в этом сценарии, находился уже внутри помещения. Столбиками изображены те самые расчетные точки, с заданной нами высотой. В данном случае 1,7 метра. Можно посмотреть, когда, в какой момент времени, дымовой слой достигает этой точки и, соответственно, происходит блокирование.

Вот, то, что я хотел сказать о двухзонной модели и о том, как она представлена в программе «СИТИС-Блок2». В самое ближайшее время программа будет доступна в бета-версии для зарегистрированных пользователей нашего сайта. Для всех остальных желающих - через неделю или две.

---

### **Вопрос-ответ**

**Вопрос:** *Насколько можно применять данную программу для расчета, например, коридоров, когда у меня соотношения размеров совершенно разные?*

**Карькин И.Н.:** Когда я рассказывал про модель CFAST, то говорил, что на самом деле там, где геометрические размеры выходят за область ее определения, и в «СИТИС-Блок2» это тоже будет реализовано, включаются другие алгоритмы. То есть, существует алгоритм для расчета длинных коридоров, шахт. В первых версиях Блока, тоже будет возможность расчета только одного этажа, просто системы помещений. Потом мы вероятно добавим и перетоки с одного этажа на другой.

**Вопрос:** *Есть ограничения в не только в самом методе, но еще и в программе.*

**Карькин И.Н.:** В текущих версиях существует ограничение благодаря тому, что топологию нельзя нарисовать произвольно, все рисуется здесь сейчас. Топология рисуется все равно прямоугольником. Можно сделать параллелограмм. В любом случае, если вы про коридоры, то у них должно быть четко два параметра – ширина и длина.

**Вопрос:** *Расчеты атриумов и антресолей на этой программе не сделать?*

**Карькин И.Н.:** Нет.

**Вопрос:** *Максимальная высота помещения ограничена?*

**Карькин И.Н.:** Здесь так же как с вопросом, там про длинные коридоры и шахты. Там включается эмпирический алгоритм, который в результате решает задачу.

**Вопрос:** *Ваша программа разработана на базе CFAST Принципиальных отличий, помимо пользовательской оболочки, нет*

**Карькин И.Н.:** Конечно, потому что на самом деле это очень большая работа, если бы мы сами взялись за разработку, грубо говоря, того же самого, то мы должны были бы обосновывать, проводить весь процесс валидации нашей модели. Например, если говорить про интегральную модель, они ее как бы сделали. Есть сравнения с такой же интегральной моделью, но той колоссальной работы, которая здесь была проделана для подтверждения правильности, пока нет.

**Вопрос:** *А с авторским правом не возникает у вас проблем? Или они выставили в свободное пользование?*

**Карькин И.Н.:** Да, в свободное. Тем более, что мы ничего не меняем, мы пишем, что это CFAST, но не говорим, что это мы сделали. Мы делаем оболочку. Это третья сторонняя разработка, то есть это вполне допустимо.

**Вопрос:** *Илья Николаевич, по сценарию пожар в зале на третьем этаже. До куда мы можем посчитать? Только до лестничной клетки?*

**Карькин И.Н.:** Да

**Вопрос:** *Каким образом мы пожарным докажем, что мы правы? Что мы не до выхода посчитали, до нулей, а именно до лестничной клетки?*

**Карькин И.Н.:** В данном случае, можно использовать программы, если считается, что у вас дверь надежная, с доводчиком или есть подпор на лестнице, что лестница в результате является безопасной зоной.