

4174-ТР-04

Техническое руководство

СИТИС: Блок 2.55

Редакция 4

© 2008-2011 СИТИС

Аннотация

Данный документ является техническим руководством программы «СИТИС: Блок».

В документе приведены основные математические зависимости расчетного модуля CFAST, границы возможного применения модели, показано соответствие модели положениям российским нормативным и методическим документам в области пожарной безопасности, описаны действия по обработке исходных данных и результатов расчетного модуля.

Версии программного обеспечения

Данное техническое руководство применимо к версиям программы «СИТИС: Блок» начиная с «СИТИС: Блок 2.55».

Ключевые слова

CFAST, двухзонная модель, опасные факторы пожара, технический регламент, пожарная безопасность, сценарий пожара, СИТИС: Блок

Сведения о разработчиках

Карькин И.Н., к.ф.-м.н., директор ООО «СИТИС»

Карпова О.В., аналитик ООО «СИТИС»

Контарь Н.А., инженер ООО «СИТИС»

Грачев В.Ю., директор ООО «Грачев и Партнеры»

Авторское право

© ООО «СИТИС», 2012 г.

ООО «СИТИС» предоставляет право бесплатных печати, копирования, тиражирования и распространения этого документа в сети Интернет и локальных и корпоративных сетях обмена электронной информацией. Не допускается взимание платы за предоставление доступа к этому документу, за его копирование и распечатывание. Не разрешается публикация этого документа любым другим способом без письменного согласия ООО «СИТИС».

Оглавление

1. Термины и определения.....	6
2. Обозначения.....	8
2.1. Обозначения в модели CFAST.....	8
2.2. Обозначения в модели Методики.....	9
3. Описание программы «СИТИС: Блок».....	12
4. Математическая модель CFAST.....	13
4.1. Двухзонная модель.....	13
4.2. Основные зависимости.....	14
4.3. Пламя.....	15
4.4. Дымовая струя.....	17
4.5. Потoki через проемы.....	18
4.6. Коридорный алгоритм.....	20
4.7. Теплообмен.....	21
4.8. Излучение.....	21
4.9. Конвекция.....	22
4.10. Теплопроводность.....	23
4.11. Однозонное приближение.....	24
4.12. Численная реализация модели.....	24
5. Область применения модели CFAST.....	27
6. Существенные параметры модели CFAST.....	28
6.1. Описание.....	28
6.2. Геометрия.....	28
6.3. Мощность пожара.....	29
6.4. Прoемность.....	29
6.5. Подсосы и перетоки.....	30
6.6. Излучение.....	30
6.7. Ограничения модели CFAST.....	30
7. Точность модели CFAST.....	32
8. Соответствие модели CFAST модели Методики.....	33
9. Препроцессор «СИТИС: Блок».....	36
10. Постпроцессор «СИТИС: Блок».....	39
11. Требования к ресурсам.....	42
12. Обзор сведений о валидации модели CFAST.....	43
13. Обзор основных методов верификации расчетов.....	47

14.Список литературы.....	48
---------------------------	----

1. Термины и определения

- 1.1. **двухзонная модель** — математическая модель расчета тепломассопереноса при пожаре, в основе которой лежит выделение двух контрольных объемов
- 1.2. **валидация** — документированное доказательство достоверности метода [5]
- 1.3. **верификация** — документированное доказательство достоверности полученного результата [5]
- 1.4. **источник зажигания** — средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения [1]
- 1.5. **качественный анализ** — выявление тенденций и закономерностей на основе обобщения существующей практики
- 1.6. **количественный анализ** — определение численных характеристик процессов и объектов, расчет
- 1.7. **концептуальная модель** — абстрактная модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства её элементов и причинно-следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования
- 1.8. **математическая модель** — упрощенное отображение зависимостей и закономерностей реальных объектов и явлений в математической форме
- 1.9. **Методика** — «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности», утвержденная приказом МЧС № 382 от 30.06.09 г. [2]
- 1.10. **модель** — упрощенное отображение зависимостей и закономерностей реальных объектов и явлений в форме, удобной для решения определенных задач;
- 1.11. **модель CFAST** — двухзонная модель расчета тепломассопереноса при пожаре, реализованная в программе CFAST
- 1.12. **модель Методики** — двухзонная модель расчета тепломассопереноса при пожаре, описанная в Приложении 6 *Методики*
- 1.13. **необходимое время эвакуации** — время с момента возникновения пожара, в течение которого люди должны эвакуироваться в безопасную зону без причинения вреда жизни и здоровью людей в результате воздействия опасных факторов пожара [1]

- 1.14. **опасные факторы пожара (ОФП)** — факторы пожара, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу [1]
- 1.15. **очаг пожара** — место первоначального возникновения пожара [1]
- 1.16. **пожарный риск** — мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей [1]
- 1.17. **расчетный сценарий ОФП** — набор данных, описывающий входные параметры для моделирования распространения ОФП в данном здании (создается в расчетной программе)
- 1.18. **расчетная точка** — точка в здании, которая используется для указания в сценарии, что для нее следует получить результаты расчета в расчетной программе. В расчетной точке выполняется сравнение времени эвакуации и времени блокирования [6]
- 1.19. **система противопожарной защиты** — комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на защиту людей и имущества от воздействия ОФП и (или) ограничение последствий воздействия ОФП на объект защиты (продукцию) [1]

2. Обозначения

2.1. Обозначения в модели CFAST

2.1.1. Индекс i может принимать значения U и L , которые относятся соответственно к верхнему (дымовому) и нижнему слою.

2.1.2.	A_S	Площадь конструкции, m^2
2.1.3.	A_W	Площадь проема, m^2
2.1.4.	c_p	Удельная теплоемкость, $Дж\ кг^{-1}K^{-1}$
2.1.5.	E_i	Внутренняя энергия i -ого слоя, $Дж$
2.1.6.	h	Коэффициент конвективной теплопередачи
2.1.7.	H	Высота помещения, $м$
2.1.8.	h_i^*	Изменение энтальпии i -ого слоя, $Дж/с$
2.1.9.	L	Длина помещения, $м$
2.1.10.	m_i^*	Изменение массы i -ого слоя, $кг/с$
2.1.11.	m_e^*	Массовый расход дыма от источника, $кг/с$
2.1.12.	m_W^*	Массовый расход газов через проем, $кг/с$
2.1.13.	m_{HCl}	Масса HCL, $кг$
2.1.14.	P	Давление, $Па$
2.1.15.	q	Тепловой поток, $Вт/м^2$
2.1.16.	Q_f	Скорость тепловыделения источника, $Вт$
2.1.17.	T_i	Температура i -ого слоя, K
2.1.18.	T_S	Температура конструкции, K

2.1.19.	v	Скорость газа, $м/с$
2.1.20.	V	Объем помещения, $м^3$
2.1.21.	W	Ширина помещения, $м$
2.1.22.	V_i	Объем i -ого слоя, $м^3$
2.1.23.	Z	Высота нижней границы дымового слоя, $м$
2.1.24.	ρ_i	Плотность i -ого слоя, $кг/м^3$
2.1.25.	ρ_{HCl}	Плотность HCL, $кг/м^3$

2.2. Обозначения в модели *Методики*

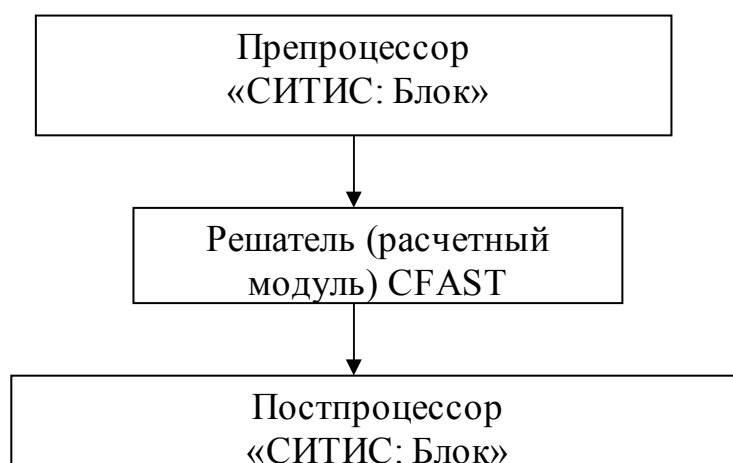
2.2.1.	A	Площадь помещения, $м^2$
2.2.2.	B	Ширина проема, $м$
2.2.3.	$C(T)$	Теплоемкость материала конструкции при температуре T , $Дж\ кг^{-1}\ K^{-1}$
2.2.4.	c_p	Удельная теплоемкость дыма, $Дж\ K^{-1}\ кг^{-1}$
2.2.5.	D	Дымообразующая способность горючего материала, $Нп\ м^{-2}\ кг^{-1}$
2.2.6.	G_K	Массовый расход дыма через конвективную колонку, $кг\ с^{-1}$
2.2.7.	$G_{П}$	Массовый расход дыма через открытые проемы в помещении, $кг\ с^{-1}$
2.2.8.	H	Высота помещения, $м$
2.2.9.	H_f	Низшая теплота сгорания, $МДж/кг$
2.2.10.	L_i	Массовый выход i -ого токсичного продукта горения, $кг/кг$

2.2.11.	L_K	Потребление кислорода при сгорании единицы массы горючего материала, $кг/кг$
2.2.12.	m	Общая масса дыма в задымленной зоне, $кг$
2.2.13.	m_i	Масса i -ого токсичного продукта горения в задымленной зоне, $кг$
2.2.14.	m_K	Масса кислорода в задымленной зоне, $кг$
2.2.15.	Q	Энтальпия продуктов горения в задымленной зоне, $кДж$
2.2.16.	Q_f	Мощность очага пожара, $кВт$
2.2.17.	Q_K	Тепловая мощность, вносимая в задымлённую зону конвективной колонкой, $кВт$
2.2.18.	$Q_{кон}$	Тепловая мощность, теряемая в конструкции, $кВт$
2.2.19.	$Q_{п}$	Тепловая мощность, удаляемая с дымом через открытые проёмы, $кВт$
2.2.20.	S	Оптическое количество дыма, $Ип м^2$
2.2.21.	$S(t)$	Зависимость площади источника пожара от времени, $м^2$
2.2.22.	T	Температура среды в задымленной зоне, $К$
2.2.23.	T_0	Температура среды у необогреваемой поверхности, $К$
2.2.24.	$T_i(y)$	Прогрев i -ой конструкции по толщине y
2.2.25.	T_c	Температуры горячей струи
2.2.26.	T_w	Температура обогреваемой части конструкции, $К$
2.2.27.	V_D	Объем задымленной зоны, $м^3$
2.2.28.	x_i	Массовая концентрация i -ого токсичного продукта горения в задымленной зоне, $кг/кг$

2.2.29.	x_H	Массовая концентрация кислорода, $кг/кг$
2.2.30.	Z	Высота нижней границы слоя дыма, $м$
2.2.31.	Z_i	Текущая высота незадымленной зоны в i -ом помещении
2.2.32.	α_k	Конвективный коэффициент теплоотдачи, $Вт м^{-2} К^{-1}$
2.2.33.	α_l	Лучистый коэффициент теплоотдачи, $Вт м^{-2} К^{-1}$
2.2.34.	δ	Толщина ограждающей конструкции, $м$
2.2.35.	ζ	Аэродинамический коэффициент проема
2.2.36.	$\lambda(T)$	Теплопроводность материала конструкции при температуре $T(y)$, $Вт м^{-1} К^{-1}$
2.2.37.	μ	Оптическая плотность дыма, $Нп м^{-1}$
2.2.38.	ρ	Плотность дыма при температуре T , $кг м^{-3}$
2.2.39.	ρ_0	Плотность воздуха при начальной температуре T_0 , $кг м^{-3}$
2.2.40.	ρ_2	Плотность дыма в задымленной зоне соседнего помещения при температуре дыма T , $кг м^{-3}$
2.2.41.	ψ	Скорость выгорания горючего материала, $кг с^{-1}$
2.2.42.	η	Коэффициент полноты сгорания

3. Описание программы «СИТИС: Блок»

- 3.1. Программа «СИТИС: Блок 2» предназначена для расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара согласно Приложения №6 *Методики* [2]. Программа разработана на основании модели CFAST (Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model /единая модель развития пожара и перемещения дыма), созданной пожарным исследовательским отделом Национального института стандартов и технологии США [11].
- 3.2. CFAST является расчетным модулем программы «СИТИС: Блок». «СИТИС: Блок» позволяет пользователю осуществлять ввод данных, затем преобразует данные в формат CFAST и запускает расчетный модуль. После выполнения расчетов «СИТИС: Блок» преобразует результаты в удобный для восприятия вид, и предоставляет их пользователю.
- 3.3. Таким образом, когда речь идет о модели или о расчете, речь идет о CFAST.
- 3.4. Схема взаимодействия программы «СИТИС: Блок» и расчетного модуля CFAST:

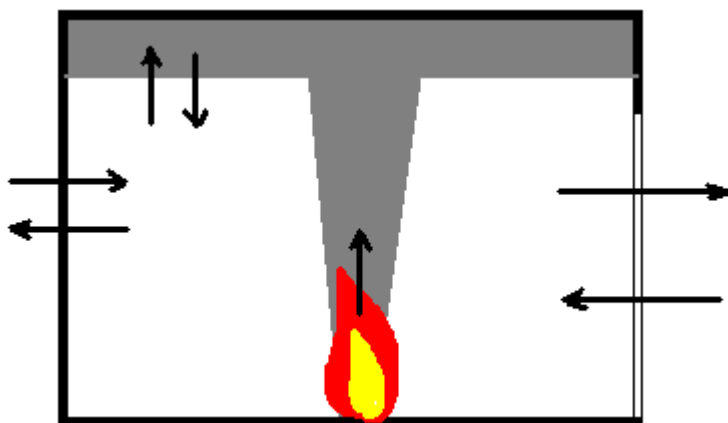


- 3.5. Решатель (англ. Solver) — программное обеспечение, предназначенное для решения рассматриваемой математической задачи. На вход решателю поступает описание задачи в некоторой заданной форме, а на выходе он выдает решение задачи.
- 3.6. Препроцессор — программа, принимающая данные на входе, и выдающая данные, предназначенные для входа решателя.
- 3.7. Постпроцессор — программа, принимающая данные от решателя и преобразующая их в удобный для восприятия вид.

4. Математическая модель CFAST

4.1. Двухзонная модель

- 4.1.1. На сегодняшний день CFAST является одной из лучших двухзонных моделей для расчета тепломассопереноса при пожаре.
- 4.1.2. Двухзонная модель тепломассопереноса при пожаре предполагает разделение каждого расчетного помещения на два контрольных объема (зоны) — верхний (дымовой) слой и нижний слой. Дополнительными контрольными объемами в помещении с источником пожара являются дымовая струя и припотолочная струя. В пределах каждой зоны температурные и другие поля параметров газовой среды считаются однородными.
- 4.1.3. Многочисленные натурные пожарные испытания подтвердили, что двухзонные модели демонстрируют достаточно достоверную картину пожара: горячие дымовые газы скапливаются под потолком, образуя дымовой слой, и параметры внутри слоя отличаются незначительно по сравнению с различием параметров между верхними и нижними слоями.
- 4.1.4. Программа CFAST 6.1 реализует двухзонную модель расчета тепломассопереноса при пожаре и позволяет прогнозировать параметры продуктов горения (температуру, снижение видимости, концентрацию токсичных продуктов горения) и их распространение по зданию.
- 4.1.5. Схема двухзонной модели



- 4.1.6.
- 4.1.7. Основа зонной модели — система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих законы сохранения массы и энергии. Эти уравнения отражают всю совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных процес-

сов, присущих пожару, таких как тепловыделение в результате горения, дымовыделение в пламенной зоне, изменение оптических свойств газовой среды, выделение и распространение токсичных газов, газообмен помещений с окружающей средой и со смежными помещениями, теплообмен и нагревание ограждающих конструкций, снижение концентрации кислорода в помещении. Параметры среды в каждой зоне — искомые функции, независимый аргумент — время. Также искомыми функциями являются координаты, определяющие положение границ характерных зон (в первую очередь, высоту дымового слоя).

4.2. Основные зависимости

- 4.2.1. В основе математической модели CFAST лежит задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В систему входят уравнения сохранения массы, энергии (первый закон термодинамики), уравнение состояния идеального газа, отношения для плотности и для внутренней энергии [11]
- 4.2.2. В зонной модели действует следующее приближение: расчетная область разделяется на конечное число расчетных объемов, в каждом из которых свойства параметров считаются постоянными по всему объему.
- 4.2.3. Все процессы в модели могут быть описаны в терминах массовых и тепловых потоков: например, вентиляция есть обмен массой и энергией между зонами соседних помещений; пламя есть увеличение энергии верхнего слоя, а также передача массы и энергии из нижнего слоя в верхний; конвекция представляет собой обмен энергией между газовым слоем и окружающими стенами.
- 4.2.4. Используя определения плотности, внутренней энергии и состояния идеального газа, **уравнения можно формулировать различными способами**, которые эквивалентны физически, но отличаются в вычислительных свойствах.
- 4.2.5. В модели CFAST уравнения сформулированы относительно следующих переменных: давление, объем дымового слоя, температура верхнего и нижнего слоев:

4.2.6.
$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (h_L^* + h_U^*)$$

$$4.2.7. \quad \frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[(\gamma - 1) h_U^* - V_U \frac{dP}{dt} \right]$$

$$4.2.8. \quad \frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[(h_U^* - c_p^* m_U T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right]$$

$$4.2.9. \quad \frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[(h_L^* - c_p^* m_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right]$$

4.2.10. Система замыкается уравнениями для расчета источниковых членов.

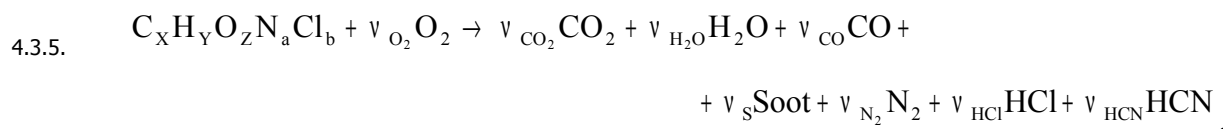
4.3. Пламя

4.3.1. Пламя в модели CFAST — это источник топлива в заданном количестве. При сгорании топлива выделяется энергия, и образуются продукты горения.

4.3.2. CFAST позволяет моделировать несколько источников горения в одном или нескольких помещениях. Источники рассчитываются полностью автономно, их взаимодействие не учитывается. Источники могут активироваться временем, температурой или тепловым потоком.

4.3.3. Модель не включает в себя модель пиролиза для предсказания развития пламени, пиролиз для каждого источника определяет пользователь.

4.3.4. В основном программа использует простое определение реакции горения, включающей основные продукты горения углеводного топлива.



4.3.6. где стехиометрические коэффициенты ν_{O_2} , ν_{CO_2} и т.д. показывают молярные соотношения стехиометрического баланса уравнения.

4.3.7. В простых случаях углеводородного топлива реакция с кислородом идет с образованием углекислого газа и воды. В этом случае требуется задать только теплоту сгорания и скорость пиролиза. Если топливо содержит кислород, азот или хлор, реакция становится более сложной. В этом случае выделение отдельных газовых компонентов описывается пользователем.

4.3.8. Расчетными величинами являются CO_2 , CO , вода, кислород, сажа. Азот участвует в уравнении только как растворитель. Хлористый и цианистый водород отслеживаются через заданные пользователем объемы выделения. Сгорание CO до CO_2 в модель не включено.

4.3.9. Тепловыделение может ограничиваться наличием доступного кислорода. Полное сгорание происходит только при его достаточном количестве. Если кислорода недостаточно, несгоревшее топливо распространяется от зоны к зоне, пока достаточность кислорода и высокая температура поддерживают горение.

4.3.10. Тепловыделение от сгорания топлива:

$$Q_f = m_f H_c$$

4.3.11. Для этого требуется масса кислорода:

4.3.12.
$$m_o = \frac{Q_f}{E_o} = m_f \frac{H_c}{E}$$
,

4.3.13. где E_o — тепловыделение на единицу сгоревшего кислорода, принято $1,31 \cdot 10^7$ Дж/кг.

4.3.14. Если в топливе есть кислород, то для горения кислорода требуется меньше:

4.3.15.
$$m_{O, \text{требуется}} = m_o - m_{O, \text{в топливе}}$$

4.3.16. Если кислорода достаточно, топливо полностью сгорает. Однако, если кислорода недостаточно, то сгорает столько топлива, сколько позволяет присутствующий кислород

4.3.17.
$$m_{O, \text{реально}} = \min(m_{O, \text{доступно}}, m_{O, \text{требуется}})$$

4.3.18.
$$m_{f, \text{реально}} = m_{O, \text{доступно}} \frac{E_o}{H_c}$$

4.3.19. В модели CFAST горение прекращается, если количество кислорода уменьшается ниже определенного значения, заданного пользователем.

4.3.20. Тепловыделение от пламени имеет конвективную и лучистую составляющую:

4.3.21.
$$Q_{f,R} = \chi_R Q_f$$

4.3.22.
$$Q_{f,C} = (1 - \chi_R) Q_f$$
,

4.3.23. где χ_R — доля тепла от пламени, расходуемая на излучение. Конвективная энергия $Q_{f,C}$ является движущей силой струй дыма.

4.3.24. Подробнее о модели пиролиза и источника пожара можно прочитать в п. 3.4.1. Технического руководства CFAST [11].

4.4. Дымовая струя

4.4.1. Дымовая струя формируется над источником пожара. Она переносит массу и энергию из нижней зоны в верхнюю, что рассчитывается с помощью определенных зависимостей.

4.4.2. Для перемещения массы и энергии существует две движущие силы: внутри помещения это струя дыма; между помещениями это отверстия вентиляции, окна, двери.

4.4.3. Как уже говорилось ранее, в каждом помещении выделены верхняя и нижняя зоны. В начале моделирования верхняя зона имеет объем 0,001 от объема помещения (во избежание ошибки деления на ноль в начале моделирования). Верхняя зона пополняется массой и энергией от источника пожара, увеличивается в объеме, нижняя зона уменьшается в объеме, и граница дымового слоя опускается. На первых этапах нет потока из верхней зоны в соседнее помещение — наоборот, верхняя зона «выдавливает» в соседнее помещение нижнюю. Затем граница дымового слоя достигает верха проема, и возникает движение дымовых газов из верхней зоны в соседнее помещение. При этом нижняя зона второго помещения выдавливается через проем в первое. Возникает поток воздуха в помещение горения. Так что возможен поток воздуха через проем в разные стороны одновременно. Все потоки движутся за счет разности давлений и плотностей, вызываемых разностями температуры и высотой границы дымового слоя.

4.4.4. Расход продуктов горения от источника пожара в приближении Маккеффри рассчитывается следующим образом:

$$4.4.5. \quad \frac{m_e}{Q_f} = \begin{cases} 0.011 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.566} & \text{для области факела} \\ 0.026 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.909} & \text{для переходной области} \\ 0.124 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{1.895} & \text{для области колонки} \end{cases}$$

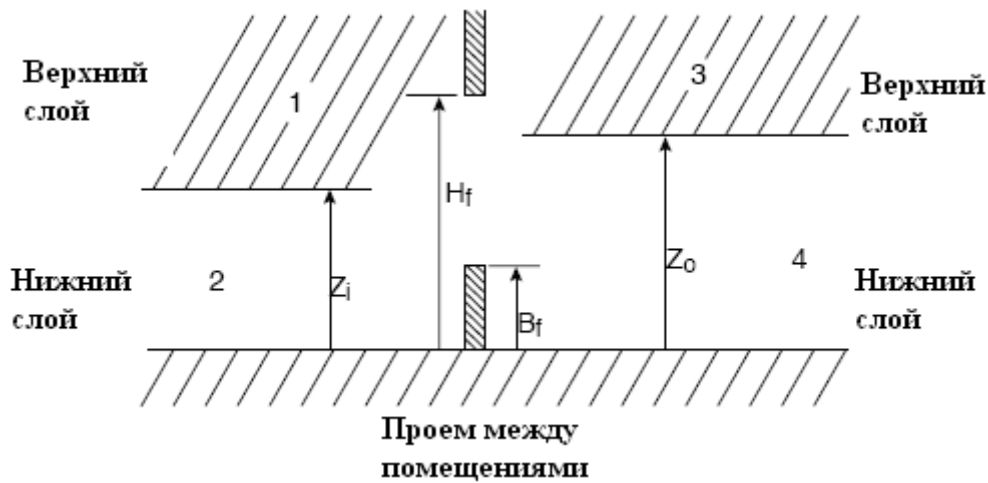
4.4.6. Соотношения Маккеффри основаны на распространенном приближении точечного источника. Коэффициенты рассчитаны на основе экспериментальных соотношений.

- 4.4.7. Очевидно, что высота, которой может достигнуть дымовая струя, зависит от тепловыделения от источника пожара. Когда источник слишком мал, дымовая струя может не иметь достаточной энергии, чтобы достигнуть потолка: струя увлекает за собой холодный окружающий воздух, и в какой-то точке плавучесть понижается до такой степени, что струя не может больше подниматься. Если же в струе достаточно энергии, она достигает верхнего (дымового) слоя.
- 4.4.8. Данный момент создает одно из ограничений зонной модели: источник пожара должен иметь достаточную мощность, чтобы дымовая струя могла поставлять энергию в дымовой слой.
- 4.4.9. Подробнее о модели дымовых струй пожара можно прочитать в п. 3.4.2. Технического руководства CFAST [11].

4.5. Потоки через проемы

- 4.5.1. В CFAST существует два типа проемов — горизонтальные и вертикальные. Отметьте, что в «СИТИС: Блок» проемы называются наоборот, поскольку в Блоке название соответствует расположению, а в CFAST — потоку. Так, например, дверь в «СИТИС: Блок» называется вертикальным проемом, поскольку расположена на вертикальной поверхности, а в CFAST горизонтальным, поскольку через нее проходит горизонтальный поток. В данном разделе используется терминология CFAST.
- 4.5.2. Горизонтальные проемы представляют собой двери, окна и т.п. Вертикальные — люки, отверстия в крыше для естественной вентиляции и т.п.
- 4.5.3. Потоки могут быть естественными (конвективными) или искусственными (механическая вентиляция).
- 4.5.4. Скорость искусственного потока определяется из расхода через отверстие, заданного пользователем.
- 4.5.5. Скорость потока через естественную вентиляцию зависит от разницы давлений. Так, скорость потока через горизонтальный проем:
- 4.5.6.
$$v = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$
- 4.5.7. где c — коэффициент сжатия, равный 0,7.

4.5.8. Для расчета расхода проем разбивается на части исходя из высоты дымового слоя, высоты нейтральной зоны, границ проема. В общем случае это выглядит так:



4.5.9.

4.5.10. где Z — положение дымового слоя;

4.5.11. H — положение верха проема;

4.5.12. B — положение низа проема.

4.5.13. Массовый поток рассчитывается через каждую такую часть, а затем суммируется:

$$4.5.14. \quad m_{io}^* = \frac{1}{3} C(8\rho) A_{slab} \left(\frac{x^2 + xy + y^2}{x + y} \right),$$

4.5.15. где $x = \sqrt{|P_t|}$ и $y = \sqrt{|P_b|}$, P_t и P_b — перекрестная разница давлений между верхом и низом части проема, и A_{slab} — поперечная площадь такой части. Значение плотности берется в помещении-источнике потока.

4.5.16. В случае вертикального проема дым поднимается вверх из нижнего помещения в верхнее за счет разности давлений.

4.5.17. Массовый расход потока через вертикальный проем:

$$4.5.18. \quad m_{io}^* = Cf(\gamma, \varepsilon) \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}},$$

4.5.19. где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ — отношение удельных теплоемкостей, $C=0,68+0,17\varepsilon$, $\varepsilon = \frac{\Delta P}{P}$, а f — функция ε и γ . При возникновении неустойчивости для функции f используется отношение Купера. В результате формула для потока через вертикальный проем имеет вид:

$$4.5.20. \quad m_{\text{ex}}^* = 0.1 \left(\frac{g \Delta \rho A_v^{5/2}}{\rho_{\text{av}}} \right) \left(1.0 - \frac{2 A_v^2 \Delta P}{S^2 g \Delta \rho D^5} \right),$$

4.5.21. где $D = 2\sqrt{A_v/\pi}$, S равен 0,754 для круглого отверстия и 0,942 для квадратного.

4.5.22. Подробнее о потоках можно прочитать в п. 3.4.3. Технического руководства CFAST [11].

4.6. Коридорный алгоритм

4.6.1. Одно из допущений стандартной зонной модели состоит в том, что горячие газы, попавшие в помещение, мгновенно распределяются по всей верхней зоне, увеличивая ее глубину. Такое приближение становится неверным в случае длинных коридоров, так что требуется учитывать задержку во времени на распространение припотолочной струи дыма по коридору.

4.6.2. Припотолочная струя в коридоре может быть названа одномерным гравитационным течением. В первом приближении скорость потока зависит от разности плотности газов дымовой струи и окружающего воздуха. Скорость также зависит от толщины струи под потолком. Простая формула скорости потока может быть выведена из равенства потенциальной энергии $mgd_0/2$ струи на половине высоты $d_0/2$ и кинетической энергии $mV^2/2$

$$4.6.3. \quad V = \sqrt{gd_0},$$

4.6.4. где g — ускорение свободного падения,

4.6.5. d_0 — высота потока,

4.6.6. V — скорость потока.

4.6.7. Если разность плотностей между дымовой струей и окружающим воздухом невелика, скорость пропорциональна $\sqrt{gd_0 \Delta \rho / \rho_{\text{cj}}} = \sqrt{gd_0 \Delta T / T_{\text{amb}}}$, где T_{amb} и ρ_{amb} — температура и плотность окружающего воздуха, T_{cj} и ρ_{cj} — температура и плотность дымовой струи, и $\Delta T = T_{\text{cj}} - T_{\text{amb}}$.

4.6.8. Проинтегрировав уравнение Бернулли, получаем, что изменение давления внизу струи $P_b=0$, а вверху струи $P_t = gd_0(\rho_{cj} - \rho_{amb})$, и используя коэффициент проема равный 0,74, получим значение скорости:

$$4.6.9. \quad v_0 \approx 0.7 \sqrt{gd_0 \frac{\Delta T}{T_{amb}}}.$$

4.6.10. Для учета увеличения толщины дымовой струи за счет остывания при взаимодействии с окружающим воздухом, используются дополнительные соотношения, полученные из натуральных и численных экспериментов.

4.6.11. Подробнее о коридорном алгоритме можно прочитать в п. 3.4.4. Технического руководства CFAST [11].

4.7. Теплообмен

4.7.1. Слои газа получают и теряют энергию за счет излучения и конвекции. Излучение передается пламенем, дымовыми газами, поверхностями. Излучение есть функция разности температур и коэффициента излучения слоев газа и поверхностей. Обычно излучение с поверхностей меняется в очень небольшом диапазоне. Для газов, напротив, коэффициент излучения есть функция концентрации сажи, воды, углекислого газа и др. Ошибка в задании концентрации газов дает погрешность в расчете излучения, что влияет на температуру, что приводит к ошибкам в расчете потоков газов. Это показывает, как взаимосвязано все в модели.

4.8. Излучение

4.8.1. Излучение является важной частью энергетического баланса, особенно вблизи огня (в помещении пожара). Лучистый теплообмен рассчитывается исходя из температуры стен и газового слоя, тепловыделения от огня и коэффициента излучения. Для расчета излучения в каждой зоне решается тепловой баланс для всех поверхностей, которые поглощают или выделяют энергию в зону.

4.8.2. Для расчета излучения используются некоторые приближения. Например, предполагается, что зоны и поверхности выделяют и поглощают тепло как серые тела; огонь излучает как точечный источник; а дымовая струя не излучает вообще.

4.8.3. В модели используются следующие допущения:

- 4.8.4. – изотермичность — температура в пределах зоны газа или поверхности одинакова
- 4.8.5. – равновесие — зоны и поверхности находятся в квази-стабильном состоянии, то есть меняются медленно за время шага расчета
- 4.8.6. – точечный источник — излучает одинаково во всех направлениях долю энергии χ_p от полной энергии. Обратное излучение и излучение от дымовой струи не моделируется
- 4.8.7. – рассеивающие и серые поверхности — излучение независимо от направления и длины волны. Это позволяет ввести соотношение между излучением ε , поглощением a и отражением ρ : $\varepsilon = a = 1 - \rho$
- 4.8.8. – геометрия — помещения предполагаются прямоугольными коробками. Каждая стена параллельна или перпендикулярна другой стене. Излучение через проемы «теряется» из комнаты.

4.9. Конвекция

- 4.9.1. Конвективный поток от поверхности рассчитывается по формуле:
- 4.9.2. $q'' = hA_s(T_g - T_s)$,
- 4.9.3. где h — конвективный коэффициент, который зависит от скорости газа, температуры и свойств.
- 4.9.4. Число Нуссельта $Nu_L = hL/k$ определяется как отношение естественной конвекции к числу Релея.
- 4.9.5. Число Релея $Ra_L = g\beta(T_s - T_g)L^3/\nu\alpha$,
- 4.9.6. где L — характеристическая длина в геометрии,
- 4.9.7. g — ускорение свободного падения,
- 4.9.8. k — коэффициент теплопроводности,
- 4.9.9. β — коэффициент объемного расширения,
- 4.9.10. T_s и T_g — температуры поверхности и газа соответственно,
- 4.9.11. ν — кинематическая вязкость,
- 4.9.12. α — коэффициент температуропроводности.
- 4.9.13. Все свойства определяются при температуре $T_f = (T_s + T_g)/2$.

4.9.14. Ниже в таблице приведены соотношения, используемые в модели CFAST:

	Геометрия	Соотношения	Ограничения
4.9.15.	Стены	$\text{Nu}_L = \left(0.825 + \frac{0.387\text{Ra}_L^{1/6}}{(1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16})^{8/27}}\right)^2$	нет
4.9.16.	Потолки и полы (горячая поверхность вверху или холодная поверхность внизу)	$\text{Nu}_L = 0.13\text{Ra}_L^{1/3}$	$2 \cdot 10^8 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{11}$
4.9.17.	Потолки и полы (холодная поверхность вверху или горячая поверхность внизу)	$\text{Nu}_L = 0.16\text{Ra}_L^{1/3}$	$2 \cdot 10^8 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{10}$

4.9.18. Число Прандтля Pr — отношение кинематической вязкости к коэффициенту температуропроводности. Для воздуха коэффициент температуропроводности α и теплопроводности k как функция температуры:

4.9.19.
$$\alpha = 10^{-9} T_f^{7/4}$$

4.9.20.
$$k = \frac{0.0209 + 1.33 \cdot 10^{-5} T_f}{1 - 0.000267 T_f}.$$

4.10. Теплопроводность

4.10.1. В модели CFAST можно учитывать теплофизические свойства ограждающих конструкций. Пользователь должен помнить, что механические свойства материалов могут меняться при изменении температуры, но эти эффекты не модулируются.

4.10.2. Процедура решения одномерного уравнения теплопроводности хорошо известна. Используется приближение конечных разностей на пространственной неоднородной сетке, чтобы получить температуру стен. Тепловое уравнение дискретизируется центральными разностями второго порядка для пространственных производных и обратными разностями для временных производных. Далее решается полученная трехдиагональная система уравнений, в

результате вычисляется значение температуры для следующего временного шага. Процесс повторяется, пока тепловой поток, поступающий в стену (вычисляемый по алгоритмам конвекции и излучения), не совпадет с тепловым потоком, получаемым по закону Фурье:

$$4.10.3. \quad q'' = -k \frac{dT}{dx} .$$

4.10.4. Подробнее о теплообмене в модели можно прочитать в п.3.4.5. Технического руководства CFAST [11].

4.11. Однозонное приближение

4.11.1. Однозонное приближение используется, когда из-за смешивания невозможно выделить две зоны. Например, это приближение может использоваться в высоких узких помещениях (шахты, лестницы, воздуховоды) или в помещениях, далеких от источника пожара.

4.11.2. В однозонном приближении используются обычные источниковые члены, и следующая замена:

$$4.11.3. \quad \dot{m}_U^{new} = \dot{m}_U + \dot{m}_L$$

$$4.11.4. \quad \dot{m}_L^{new} = 0$$

$$4.11.5. \quad Q_U^{new} = Q_U + Q_L$$

$$4.11.6. \quad Q_L^{new} = 0$$

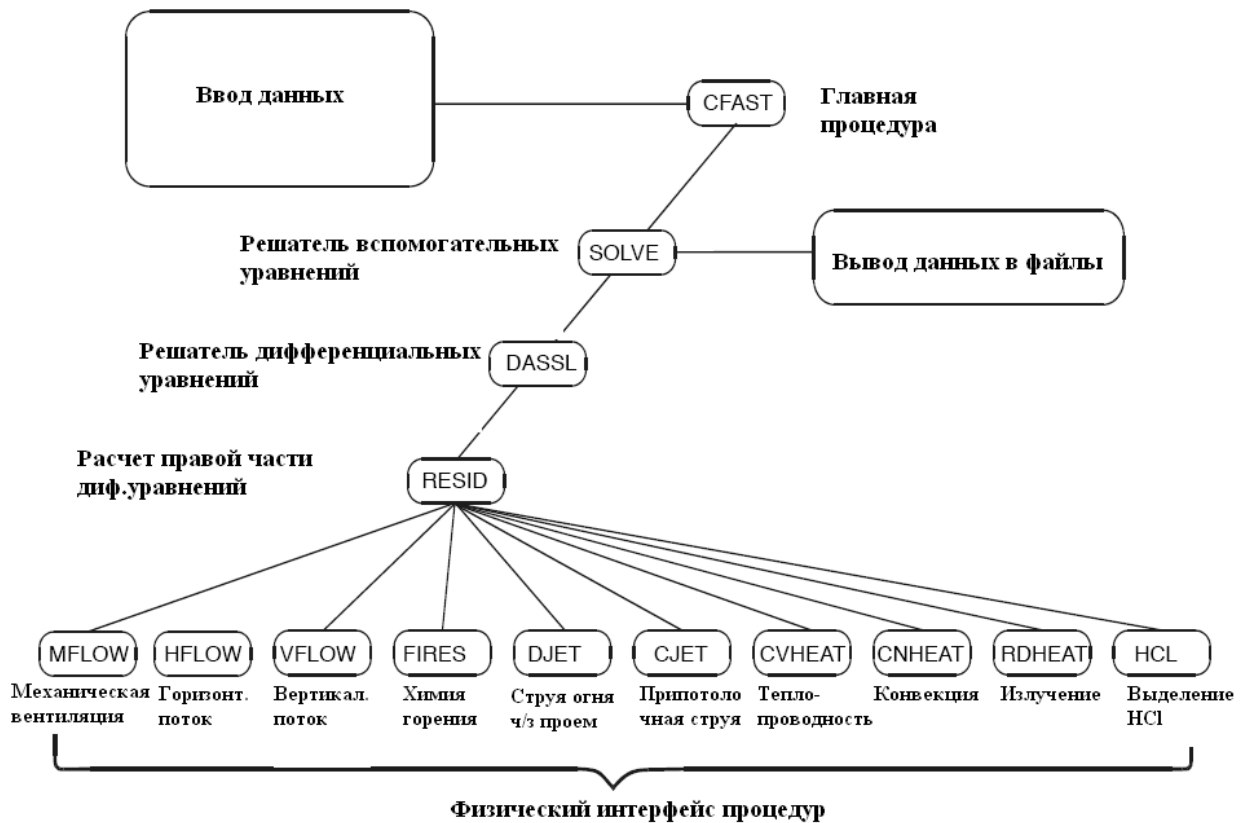
4.11.7. Подробнее об однозонном приближении можно прочитать в п. 3.8. Технического руководства CFAST [11].

4.12. Численная реализация модели

4.12.1. Один из важнейших моментов численной реализации модели: схема используемая для объединения физических процессов.

4.12.2. Метод включения новых процессов и проверки корректности кода был принят как часть объединения CCFM и FAST. Это объединение произошло в 1990 году и имело результатом более прозрачную, транспортабельную и поддающуюся проверке численную модель.

4.12.3. Модель может быть разделена на составные части: есть подпрограммы для чтения данных, расчета результатов и вывода отчета в файл или на принтер. Главные программы представлены на схеме ниже.



4.12.4.

4.12.5. Физический интерфейс процедур включает подпрограммы, которые рассчитывают такие величины, как поток массы или энергии в каждый момент времени для заданного окружения.

4.12.6. Процедуры SOLVE, RESID и DASSL — ключевые в решении физических уравнений. SOLVE контролирует программу, которая наблюдает за основным решением задачи. Она включает дифференциальный решатель DASSL, который вызывает RESID для решения транспортных уравнений. Пусть имеется решение уравнений в момент времени T , какое решение будет в момент времени $T + \Delta t$ (приращение определяется динамически программой)? Для этого решается дифференциальное уравнение вида

4.12.7.
$$\frac{dy}{dx} = f(y,t)$$

4.12.8.
$$y(t_0) = y_0,$$

4.12.9. где y — векторное представление давления, высоты дымового слоя, массы и т.д.; f — векторная функция изменения этих величин во времени; y_0 — начальное состояние в начальный момент времени t_0 .

- 4.12.10. Подпрограмма RESID рассчитывает правую часть уравнения и возвращает результаты для сравнения с предсказанными в DASSL. Когда DASSL достигает критерия сходимости для уравнения для решений в момент времени $T+\Delta t$, SOLVE обновляет решения концентрации газов, температуру стен, значения механической вентиляции и др. для этого временного промежутка.
- 4.12.11. Заметим, что в решение вовлечено несколько различных временных масштабов.
- 4.12.12. Самый быстрый процессы — химическая кинетика. Мы избавляемся от этого масштаба, считая, что химические процессы протекают бесконечно быстро. Следующий масштаб — поле потока. Здесь уравнения, представленные в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Затем идет масштаб для механической вентиляции и, наконец, теплопроводимость к объектам.
- 4.12.13. Химическая кинетика занимает время порядка миллисекунд. Транспортный масштаб порядка десятых секунды. Механическая вентиляция и проводимость примерно несколько секунд, или больше. Шаг по времени динамически подгоняется для решения текущего набора уравнений.
- 4.12.14. Подробнее о численной реализации модели можно прочитать в п.4. Технического руководства CFAST [11].

5. Область применения модели CFAST

- 5.1.1. Результаты, получаемые с помощью двухзонной модели пожара, могут быть практически значимыми в том случае, когда в газовой среде с достаточной степенью достоверности можно выделить две зоны: верхнюю с горячими газами (дым) и нижнюю, свободную от горячих газов. Такое состояние характерно для локальных пожаров, а также для начальной стадии объемных пожаров, когда характерные размеры очага пожара значительно меньше характерных размеров помещений.
- 5.1.2. В соответствии с *Методикой* [2] зонный метод описания пожара в здании может быть применен:
- 5.1.3. – для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз), когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения (для помещения, один из линейных размеров которого более чем в пять раз превышает хотя бы один из двух других линейных размеров, необходимо это помещение делить на участки, размеры которых соизмеримы между собой, и рассматривать участки как отдельные помещения, сообщающиеся проемами, площадь которых равна площади сечения на границе участков);
- 5.1.4. – для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д).
- 5.1.5. Зонная модель CFAST может быть использована:
- 5.1.6. – для оценки динамики опасных факторов пожаров в жилых, общественных и промышленных зданиях и сооружениях;
- 5.1.7. – для расчета индивидуального пожарного риска в жилых, общественных и промышленных зданиях и сооружениях;
- 5.1.8. – для расчетного определения параметров противопожарных систем – противодымной естественной и/или механической вентиляции, пожарной сигнализации и т.п.

6. Существенные параметры модели CFAST

6.1. Описание

- 6.1.1. Для выполнения расчета рассматриваемые здания и сооружения представляются в виде системы помещений, соединенными проемами, источников пожаров, дымоприемных отверстий и устройств, систем подпора воздуха. С учетом теоретических основ зонной модели и экспериментальных оценок при валидационных натуральных испытаниях, программа CFAST дает решение с достаточной инженерной точностью (10-25%) при описанных параметрах рассчитываемой модели. При других параметрах исходных данных возможность применения CFAST должна быть рассмотрена дополнительно.

6.2. Геометрия

- 6.2.1. В рассчитываемой модели помещения должны быть простой геометрической конфигурации, в которых четко образуются слои — дымовой слой, конвективная колонка и т.п. Помещения должны представляться прямоугольными призмами с соизмеримыми размерами, или с достаточной достоверностью представляться такими помещениями.
- 6.2.2. В помещениях не должно быть выступающих частей, препятствующих движению дымового слоя под потолком.
- 6.2.3. В случае, если горизонтальные размеры, длина и ширина значительно отличаются, то есть, когда помещение подобно коридору, то движение дымового слоя становится несимметричным. Если помещение узкое и высокое, то возникает возможность неравномерного прогрева. Когда размер конвективной колонки на некоторой высоте становится соизмерим с длиной или шириной помещения, то зависимости зонной модели становятся неприменимы.
- 6.2.4. В модели CFAST при длине помещения более 5 ширин используются экспериментальные зависимости распространения дымового слоя по коридорам. При высоте помещения более 6 размеров ширины, например для лестничных клеток и лифтов, используются экспериментальные зависимости для шахт. Ниже приведены рекомендуемые параметры для размеров помещений.
- 6.2.5. L — длина, W — ширина, H — высота

	Зонная модель	Требуется уточнение применимости модели	Используется алгоритм для коридора или шахты
6.2.6.	$L/W < 3$	$3 < L/W < 5$	$5 < L/W$
6.2.7.	$L/H < 3$	$3 < L/H < 6$	$6 < L/H$
6.2.8.	$W/H > 0,4$	$0,2 < L/H < 0,4$	$L/H < 0,2$

6.3. Мощность пожара

- 6.3.1. Модель не предназначена для расчета распространения пламени. Скорость тепловыделения одного или нескольких источников пожара задается пользователем. Модель ограничивает скорость тепловыделения в зависимости от доступного количества кислорода.
- 6.3.2. В модели также есть ограничение на мощность пожара на основе экспериментальных данных. Тепловыделение не должно превосходить $1 \text{ МВт}/\text{м}^3$ поскольку в этом случае двухзонное приближение становится неприменимым.
- 6.3.3. С другой стороны при расчете пожаров небольшой мощности может не формироваться дымовой слой, описываемый зонной моделью. Примером такой ситуации является дым от горящей сигареты в обычной комнате, когда мощности «пожара» недостаточно для формирования дымового слоя во всей комнате. Считается, что если температура дымового слоя отличается от температуры помещения менее чем на 1 градус, то мощность расчетного пожара может быть недостаточной для формирования слоев зонной модели, и должна быть выполнена дополнительная оценка применимости зонной модели и рассмотрена вероятность стратификации («зависания») дымового слоя.

6.4. Проемность

- 6.4.1. Для каждого отдельного помещения соотношение площади проемов между помещениями и проемов (дымоприемных устройств) естественной вентиляции к объему помещения не должно превышать $2 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Для больших значений зависимость движения воздуха и дыма через отверстия может не соответствовать предпосылкам зонной модели.

6.5. Подсосы и перетоки

- 6.5.1. Перетоки между помещениями при пожаре через неплотности дверных и оконных проемов, систем вентиляции являются важным фактором при моделировании пожаров, особенно для высотных зданий и зданий, где возможно влияние ветра (например, для случая дымоудаления через отверстие в стене или кровле без механического побуждения). Неучет влияния этих факторов в модели рассматриваемого пожара может значительно снизить точность полученных результатов и привести к неверной оценке ситуации.
- 6.5.2. Помещения в модели CFAST являются герметичными, что не согласуется с реальными зданиями. Соответственно, необходимо создавать неплотности искусственно. Неплотности могут моделироваться небольшими проемами, расположенными на внешних границах помещений. Во избежание влияния данных проемов на поведение дымового слоя, их необходимо задавать небольшой высоты и вблизи от пола.

6.6. Излучение

- 6.6.1. Поскольку программа включает сложную модель излучения и алгоритмы вентиляции, требуется дальнейшее изучение «загрязнения излучением» здания через вентиляционную систему, например образование тяги или влияния ветра на циркуляцию воздуха в здании. Излучение от огня моделируется излучением точечного источника. Это ограничивает точность модели возле источника пожара. Обмен излучением между отсеками не моделируется.

6.7. Ограничения модели CFAST

	Параметр	Максимальное значение
6.7.1.	Время расчета	86 400 с
6.7.2.	Максимум помещений	30
6.7.3.	Максимум источников горения	31
6.7.4.	Максимум источников горения в базе данных	30

6.7.5.	Максимум точек в описании одного источника горения	21
6.7.6.	Максимум материалов в теплотехнической базе данных	125
6.7.7.	Максимальное число слоев в одном материале в базе данных	3
6.7.8.	Максимум выходов механической вентиляции	60
6.7.9.	Максимум соединений между отсеками и отверстий механической вентиляции	62
6.7.10.	Максимум независимых систем механической вентиляции	15
6.7.11.	Максимум мишеней (CFAST включает в число мишеней пол каждого помещения и каждый объект)	90
6.7.12.	Максимум точек в выходном табличном файле	900
6.7.13.	Максимальная мощность источника пожара	1 $MВт/м^3$
6.7.14.	Максимальное отношение площади вентиляционных отверстий в помещении к объему помещения	2 $м^{-1}$
6.7.15.	Максимальная длина помещения	100 м
6.7.16.	Минимальная длина помещения	0,5 м

7. Точность модели CFAST

- 7.1. Точность модели зависит от её предполагаемого использования. Также она сильно зависит от точности и детальность задания входных данных, и особенно чувствительна к заданной скорости тепловыделения.
- 7.2. Исследования показывают, что предсказания модели обычно находятся в пределах 10–25 % от результатов экспериментов для ряда сценариев. В основном этого достаточно для расчетов пожарной безопасности и оценки пожарного риска.
- 7.3. Подробнее о точности применения модели можно прочитать в Руководстве по валидации CFAST [13].

8. Соответствие модели CFAST модели *Методика*

- 8.1. В основе любой модели для расчета тепломассопереноса при пожаре лежит система дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, энергии, компонентов. Уравнения могут быть сформулированы по-разному, для различных параметров: энергии, массы, плотности, объема, давления, температуры. Вследствие того, что параметры могут однозначно выражаться друг через друга:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}, E_i = c_v m_i T_i, P = R \rho_i T_i, V = V_L + V_U.$$

- 8.2. Для описания модели необходимо лишь четыре переменных, и эти переменные могут быть выбраны различным образом. При этом суть уравнений остается неизменной.

	<i>Методика</i>	CFAST
	Переменные для основных уравнений могут быть выбраны различным образом, при этом суть уравнений не меняется	
8.3.	<p>В методике ВНИИПО в качестве независимых переменных выбраны масса верхнего и нижнего слоев и внутренняя энергия верхнего и нижнего слоев.</p> <p>Для верхнего слоя:</p> $\frac{dm}{dt} = G_K - G_{II}$ $\frac{dQ}{dt} = Q_K - Q_{II} - Q_{кон}$ <p>Для нижнего слоя (предполагается, что параметры нижнего слоя остаются неизменными во время пожара):</p> $\frac{dm}{dt} = 0$	<p>В CFAST независимыми переменными выбраны давление, объем верхнего слоя и температура верхнего и нижнего слоев.</p> $\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$ $\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[(\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dt} \right]$ $\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[(\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right]$ $\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[(\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right]$

	$\frac{dQ}{dt} = 0$	
Различие в выборе переменных имеет значение только для построения модели, на результатах расчетов выбор переменных не сказывается		
<i>Масса отдельных компонентов и количество дыма</i>		
8.4.	<p>Масса токсичных газов:</p> $\frac{dm_i}{dt} = \psi L_i - x_i G_{II}$ <p>Масса кислорода:</p> $\frac{dm_K}{dt} = 0,23(G_K - \eta \psi L_K) - x_K G_{II}$ <p>Оптическое количество дыма:</p> $\frac{dS}{dt} = \psi D - G_{II} \frac{\mu}{\rho}$	$\frac{d}{dt} m_{HCL} = source - K_c (\rho_{HCL} - \rho_{bHCL}) A_w$ <p>Остальных компонентов рассчитываются аналогичным образом.</p>
Источниковые члены в моделях методика ВНИИПО и CFAST рассчитываются одинаково.		
<i>Масса компонентов дыма, вносимых в задымлённую зону конвективной колонкой</i>		
8.5.	$G_K = \begin{cases} 0.011 \times Q_f \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.566} & \text{для области факела} \\ 0.026 \times Q_f \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.909} & \text{для переходной области} \\ 0.124 \times Q_f \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{1.895} & \text{для области колонки} \end{cases}$	$\frac{m_e}{Q_f} = \begin{cases} 0.011 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.566} & \text{для области факела} \\ 0.026 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{0.909} & \text{для переходной области} \\ 0.124 \left(\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right)^{1.895} & \text{для области колонки} \end{cases}$
<i>Масса компонентов дыма, вносимых в задымлённую зону конвективной колонкой</i>		
<i>Расход воздуха через вертикальные проемы</i>		
8.6.	$G_{II} = B \cdot \xi \int_{Y_{min}}^{Y_{max}} \sqrt{2\rho(P(h) - P_2(h))} dh$	$v = C \left[\frac{2\Delta P}{\rho} \right]^{1/2}$ <p>– скорость потока газа через проем</p> <p>*</p> $m_w = v A_w$ <p>– массовый расход газа через проем</p>

Теплопередача в конструкции	
8.7.	$\frac{\partial T_i(y)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T) \cdot \rho} \frac{\partial \lambda(T)}{\partial y} \frac{\partial T_i(y)}{\partial y}$ $(\alpha_k + \alpha_l) \cdot (T_c - T_w) = -\lambda_w \left. \frac{\partial T_i(y)}{\partial y} \right _{y=0}$ $(\alpha_k + \alpha_l) \cdot (T_0 - T_i(\delta)) =$ $= -\lambda(T) \left. \frac{\partial T_i(y)}{\partial y} \right _{y=\delta}$
Мощность источника	
8.8.	$Q = \eta \psi H_f S(t)$
	В CFAST мощность источника задается пользователем.

- 8.9. Приведенное выше сравнение моделей позволяет убедиться, что модель CFAST соответствует модели *Методики* [2] и может быть использован для решения практических задачи пожарной безопасности.

9. Препроцессор «СИТИС: Блок»

9.1. В программе «СИТИС: Блок» присутствует ряд «скрытых» параметров, которые передаются в CFAST и участвуют в расчете, но при этом не задаются пользователем.

	Параметр	Значение, автоматически передаваемое в CFAST
9.2.	Параметры окружающей среды	
9.3.	Давление	101300 Па
9.4.	Относительная влажность	62 %
9.5.	Скорость ветра	0
9.6.	Высота измерительной станции	10
9.7.	Коэффициент для расчета скорости ветра как функция высоты	0,16
9.8.	Параметры проемов	
9.9.	Угол ветра (вертикальный проем)	0
9.10.	Форма горизонтального проема	круглая
9.11.	Параметры источника пожара	
9.12.	Расположение источника пожара	по центру помещения
9.13.	Алгоритм расчета пламени	Маккефри
9.14.	Нормаль к источнику пожара	вверх
9.15.	Алгоритм расчета припотолочной струи	Ceiling & Walls
9.16.	Процент кислорода, при котором прекращается горение	10 %

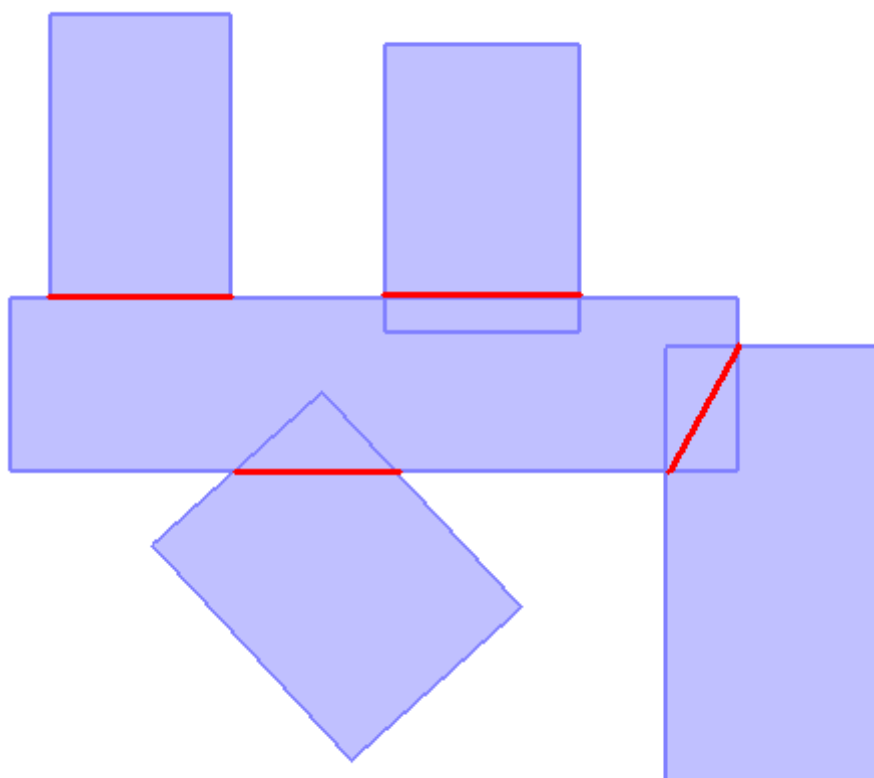
9.17.	Температура вспышки	120 C
9.18.	Высота источника	1 м
9.19.	Молярная масса топлива	0,016 кг/моль
9.20.	Масса топлива	1 кг
9.21.	Теплота сгорания	13 800 кДж/кг
9.22.	Теплота газификации	0 кДж/кг
9.23.	Температура испарения	0 C
9.24.	Доля энергии на излучение	0,3
9.25.	O/C	0
9.26.	H/C	0
9.27.	HCN	0
9.28.	St	0

9.29. Также в программе «СИТИС: Блок» присутствует ряд параметров, которые перед передачей в CFAST преобразуются некоторым образом:

	Параметр	Преобразование
9.30.	Алгоритм расчета	в зависимости от размеров помещения выбирается автоматически: – нормальный алгоритм – коридорный алгоритм – однозонная модель
9.31.	Помещения неправильной формы	квадратное помещение той же площади

9.32.	Скорость тепловыделения, <i>Вт</i>	<p>время развития до 1 <i>МВт</i> по квадратичному закону:</p> $t = \sqrt{\frac{1000}{H_f \eta \psi_{\text{уд}} \pi v^2}}$ <p>максимальная скорость тепловыделения: $HRR_{max} = H_f \eta \psi_{\text{уд}} S$</p>
9.33.	Скорость выгорания, кг/с	HRR/H_f
9.34.	CO/CO ₂	L_{co}/L_{co_2}
9.35.	C/CO ₂	$Dm/(L_{co_2} * 8740)$
9.36.	HCL	L_{HCL}

9.37. Соединения коридоров между собой обрабатываются следующим образом:



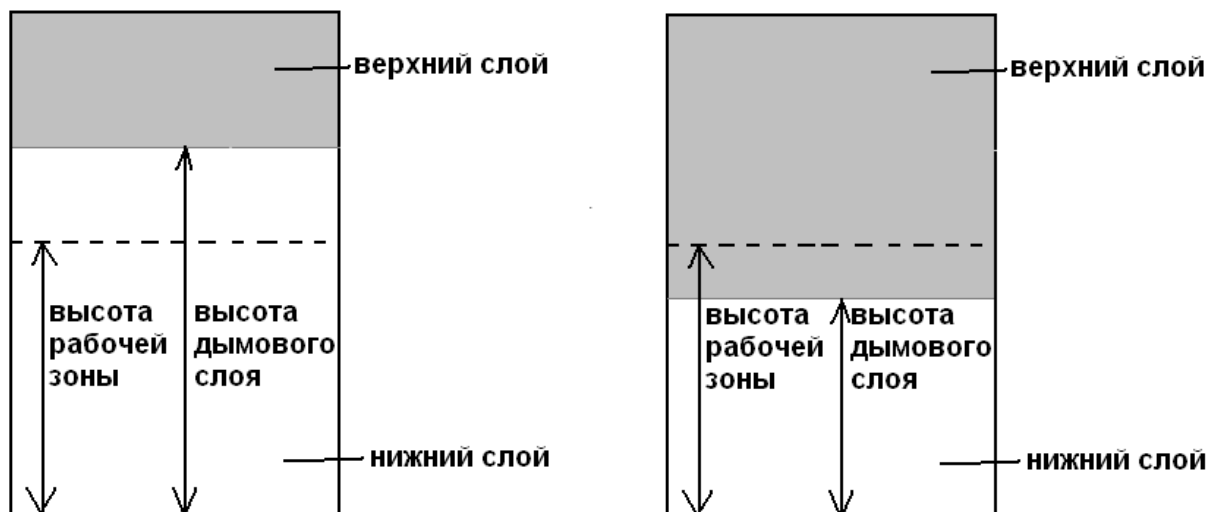
9.38. Каждая пара коридоров соединяется проемами. Красная линия показывает ширину проема в каждом конкретном случае.

10. Постпроцессор «СИТИС: Блок»

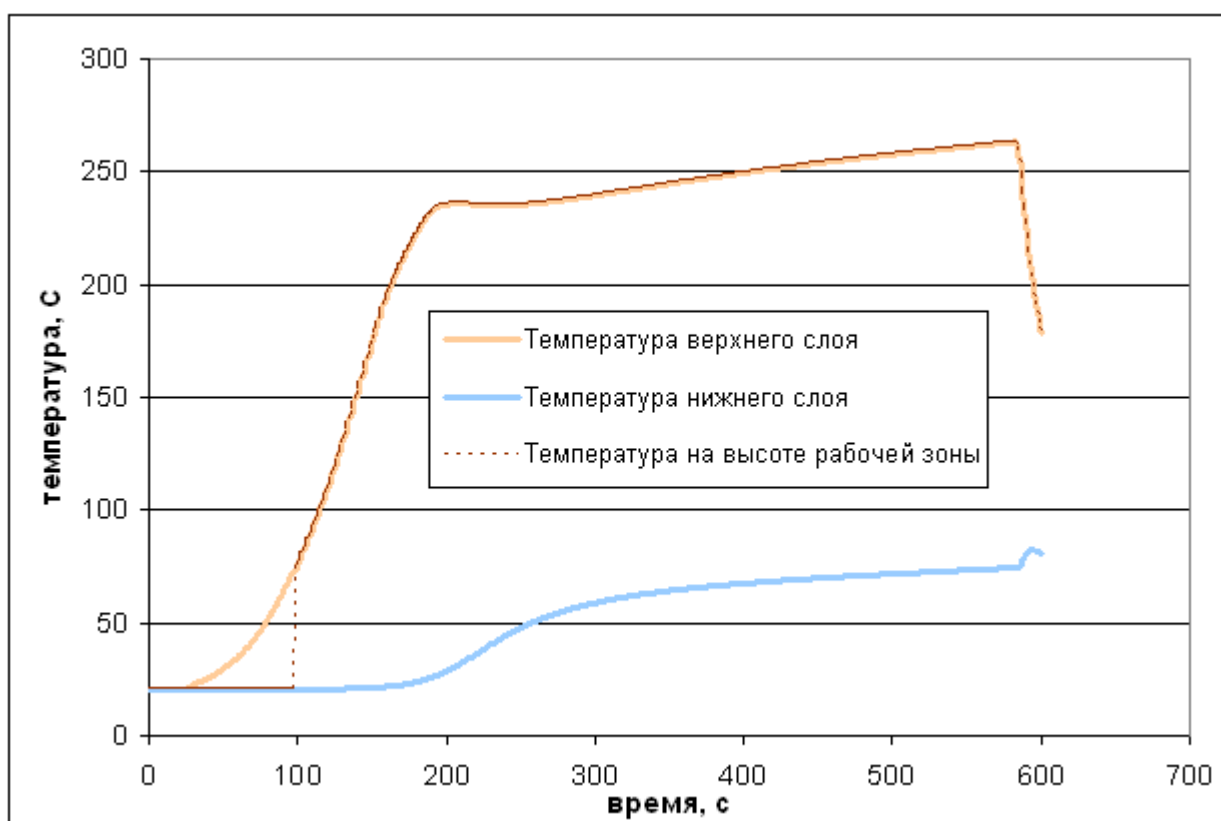
10.1. Выходные данные CFAST содержатся в следующих файлах:

10.2.	ex_n.csv	<p>Основной файл с численными результатами. Требуется для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами.</p> <p>Из этого файла для каждого помещения используются три колонки для расчета температуры:</p> <p>'Upper Layer Temp' (температура верхнего слоя)</p> <p>'Lower Layer Temp' (температура нижнего слоя)</p> <p>'Layer Height' (высота дымового слоя)</p> <p>И колонка для расчета теплового потока</p> <p>'Ambient Target' (внешняя мишень — тепловой поток к человеческому телу)</p>
10.3.	ex_s.csv	<p>Файл с численными результатами для видов газов. Требуется для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами.</p> <p>Из этого файла для каждого помещения используются следующие колонки:</p> <ul style="list-style-type: none">– концентрация кислорода (O₂)– углекислого газа (CO₂)– угарного газа (CO)– хлористого водорода (HCL)– оптической плотности (OD)
10.4.	ex_f.csv	<p>Файл с численными результатами для тепловых потоков. Для определения времени блокирования путей эвакуации не используется.</p>
10.5.	ex_w.csv	<p>Файл с численными результатами для вентиляционных потоков. Для определения времени блокирования путей эвакуации не используется.</p>

- 10.6. Поскольку в CFAST концентрация кислорода и угарного газа измеряется в процентах, угарного газа и хлористого водорода в ppm, в оптическая плотность в обратных метрах, выполняется пересчет параметров в кг/м³ для газовых параметров и в метры — для дальности видимости. Для пересчета используются следующие формулы:
- 10.7. Дальность видимости $L [м] = 2.38 / OD [м^{-1}]$
- 10.8. Концентрация кислорода и углекислого газа
- 10.9. $X [кг/м^3] = X [%] * M [кг/моль] * P [Па] / (100 * R [Дж/К*моль] * T [К])$
- 10.10. Концентрация хлороводорода и угарного газа
- 10.11. $X [кг/м^3] = X [ppm] * M [кг/моль] * P [Па] / (1\ 000\ 000 * R [Дж/К*моль] * T [К])$
- 10.12. где $X [%]$ и $X [ppm]$ — объемная доля газа;
- 10.13. $M [кг/моль]$ — молярная плотность газа;
- 10.14. $P [Па]$ — давление;
- 10.15. $R [Дж/К*моль] = 8,31 Дж/К*моль$ — универсальная газовая постоянная;
- 10.16. $T [К]$ — температура.
- 10.17. Нас интересует значение опасных факторов на высоте рабочей зоны (1,7 м). Для каждого опасного фактора имеется значение верхнем и в нижнем слоях.
- 10.18. Поэтому изменение значения опасного фактора на высоте рабочей зоны будем определять следующим образом:
- 10.19. — если высота дымового слоя **больше** высоты рабочей зоны, значение опасного фактора на высоте рабочей зоны принимается равным значению фактора в **нижнем** слое
- 10.20. — если высота дымового слоя **меньше** высоты рабочей зоны, значение опасного фактора на высоте рабочей зоны принимается равным значению фактора в **верхнем** слое.



10.21. График опасного фактора, например, температуры, будет иметь следующие вид:



10.22.

10.23. Значение параметра на высоте рабочей зоны меняется скачком, когда высота дымового слоя достигает высоты рабочей зоны.

11. Требования к ресурсам

- 11.1. Для работы программы «СИТИС: Блок» необходимы следующие минимальные требования:
- 11.2. – ПК с процессором 1,8 ГГц
- 11.3. – 512 МБ оперативной памяти
- 11.4. – цветной монитор 1024 x 768 пикселей, 16 бит
- 11.5. – операционная система: Microsoft® Windows 2000, Microsoft® Windows XP, Microsoft® Windows Vista или Microsoft® Windows 7.
- 11.6. Расчет сценария может выполняться от нескольких секунд до нескольких часов, в зависимости от сложности и детализации сценария.

12. Обзор сведений о валидации модели CFAST

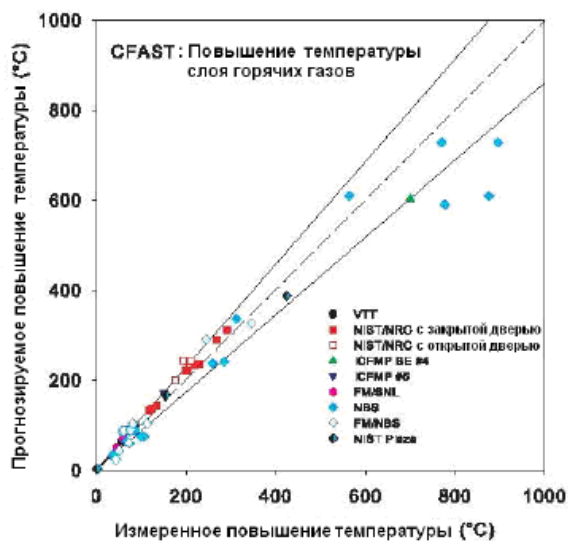
- 12.1. **Валидация** — это документированное доказательство достоверности метода. В процессе валидации выполняется сравнение результатов физического эксперимента и результатов моделирования того же процесса, определяется соответствие между физической и математической моделями.
- 12.2. Модель CFAST подверглась подробным оценочным исследованиям, проводимым специалистами Национального института стандартов и технологий США (NIST) и других организаций. Подробнее о валидации CFAST можно прочитать в документе 4174-ВЛ-01 «Руководство по валидации «СИТИС: Блок»».

	Серия испытаний	Размеры помещений	Мощность пожара Топливо
12.3.	Национальное бюро стандартов США (NBS) (испытание в стенде из одного помещения)	3,94 м x 2,26 м x 2,35 м	2,9– 7 МВт мебель
12.4.	Центр научно-технических исследований Финляндии (VTT)	27 м x 14 м x 19 м	2– 4 МВт гептан
12.5.	Национальный научно-исследовательский совет США (NRC) и Национальный институт стандартов и технологий США (NIST)	21,7 м x 7,1 м x 3,8 м	0,35– 2,2 МВт жидкое топливо
12.6.	Национальный научно-исследовательский совет США (NRC), научно-исследовательское общество «Factory Mutual Research Corporation (FMRC)» под руководством «Sandia National	8 м x 12 м x 6 м	0,5 МВт пропиленовая горелка

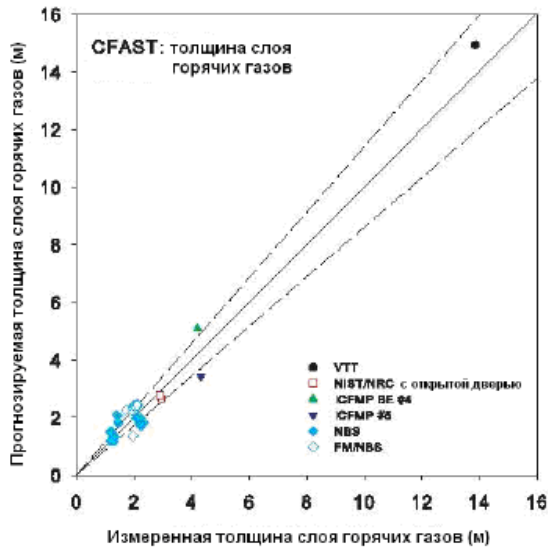
	Laboratories (SNL)»		
12.7.	Национальное бюро стандартов США (NBS) (испытание в стенде из нескольких помещений)	100 м ³	0,1– 0,5 МВт газовая горелка
12.8.	Лаборатория FM (испытание в стенде из нескольких помещений)	200 м ³	1 МВт газовая горелка
12.9.	Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) (испытания в семиэтажной гостинице)	140 000 м ³	3 МВт

12.10. По результатам обработки экспериментов и прогнозов сделаны следующие выводы:

12.11. Прогнозы высоты и температуры слоя горячих газов находятся в основном в пределах экспериментальной погрешности. Прогнозы температуры слоя горячих газов обычно слегка завышены, а высоты - слегка занижены (прогнозируемая глубина слоя чуть больше экспериментальной). Прогнозы в основном находятся в пределах 10– 20% от экспериментальных измерений. Погрешность прогноза температуры и высоты слоя горячих газов несколько выше в помещениях, удалённых от огня, по сравнению с горящим помещением.

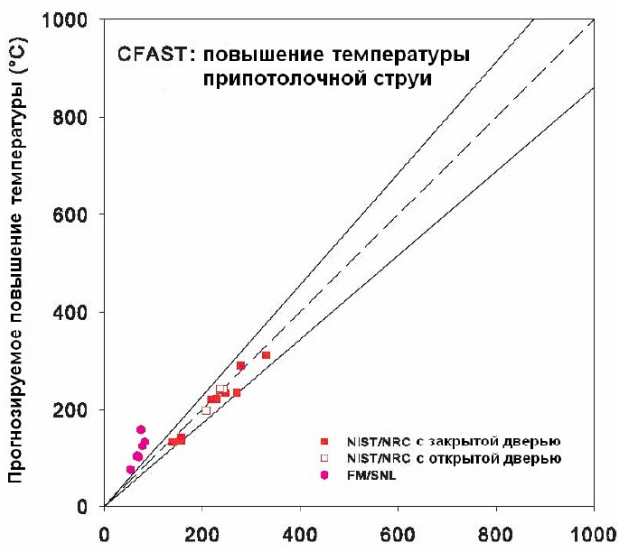


12.12.



12.13.

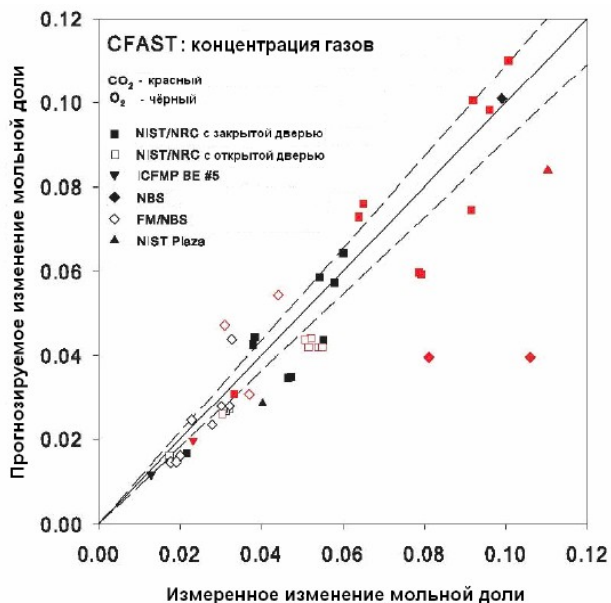
12.14. Температуру припотолочной струи CFAST в основном прогнозирует в пределах экспериментальной погрешности. В случаях, когда температура слоя горячих газов намного ниже 70 °С, наблюдается значительное завышение прогнозируемых значений.



12.15.

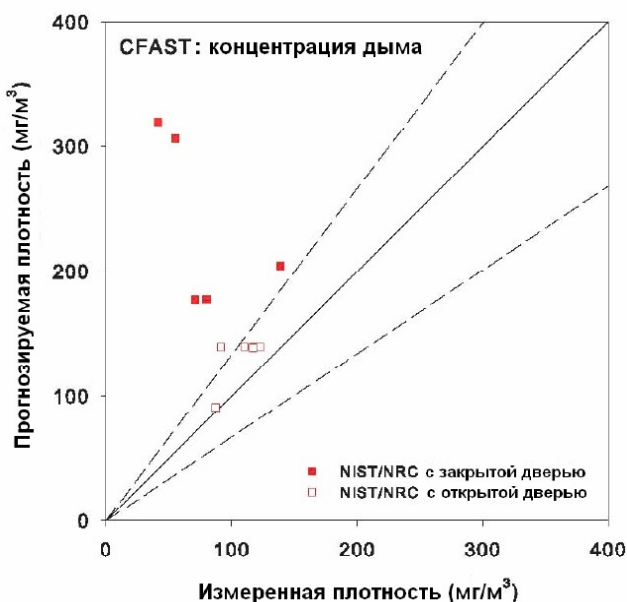
12.16. Прогнозы по высоте пламени, выполненные в программе CFAST, согласуются с визуальными наблюдениями высоты пламени в ходе экспериментов.

12.17. Прогнозы CFAST относительно концентрации газа и давления в помещении находятся в пределах экспериментальной погрешности.



12.18.

12.19. CFAST, как правило, даёт завышенный прогноз концентрации дыма. При испытаниях «с открытой дверью» (в стенде, открытом в окружающее пространство) прогнозируемые значения концентрации дыма находятся в пределах экспериментальных погрешностей, а в испытаниях «с закрытой дверью» (в изолированном стенде) — значительно превышают экспериментальные. [15]



12.20.

12.21. Прогнозы CFAST согласуются с многочисленными исследованиями и экспериментальными данными, и это свидетельствует о том, что применение модели уместно для широкого спектра сценариев пожара.

13. Обзор основных методов верификации расчетов

- 13.1. **Верификация** — это документированное доказательство достоверности результата; проверка его адекватности. Верификация подразделяется на верификацию кода и верификацию вычислений. **Верификация кода** — это проверка того, что расчетная программа адекватно реализует математическую модель. **Верификация вычислений** — проверка адекватности полученных результатов. Если валидация метода и верификация кода могут быть выполнены один раз для расчетной программы, то **верификация вычислений должна выполняться для каждого расчета.**
- 13.2. Верификация вычислений может выполняться следующими способами:
- 13.3. – сопоставление результата вычисления и инженерного суждения, основанного на имеющейся практике создания аналогичных объектов (зданий)
- 13.4. – сопоставление результата вычисления с результатом выполнения оценочного расчета — упрощенного расчета, проведенного по более грубой модели/алгоритму
- 13.5. – проведение анализа чувствительности (определение влияния неопределенности исходных данных на результат расчета)
- 13.6. – сопоставление результата вычисления с результатом уточняющего расчета — расчета, проведенного по более точной модели с использованием уточненных/расширенных исходных данных.

14. Список литературы

- 14.1. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
- 14.2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.09 г. № 382
- 14.3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
- 14.4. Материалы семинара Уральского института ГПС МЧС «Расчет индивидуального пожарного риска для общественных зданий», г.Екатеринбург, 19-21 мая 2009 г. Уральский институт ГПС МЧС
- 14.5. Грачев В.Ю. Введение в моделирование пожаров для расчета пожарного риска. - Екатеринбург: Издательский дом «Ажур», 2009. — 69 с.
- 14.6. Руководство пользователя «СИТИС: Блок 2.20»
- 14.7. ТР-5042. Валидация математических моделей пожаров. Обзор зарубежных источников.
- 14.8. ТР-5044. Пожарная нагрузка. Обзор зарубежных источников. Под редакцией Грачева В. Ю. — СИТИС, 2009.
- 14.9. ТР-5045. Противодымная защита атриумных зданий. Обзор зарубежных источников. Под редакцией Грачева В. Ю. — СИТИС, 2009.
- 14.10. NFPA 551. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. 2010 Edition.
- 14.11. NIST Special Publication 1026. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). Technical Reference Guide. April 2009.
- 14.12. NIST Special Publication 1041. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User’s Guide. December 2008.
- 14.13. NIST Special Publication. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). Software and Experimental Validation Guide CFAST. May 2008.