

ООО «СИТИС»  
ТР – 5036-5

---

**СFAST. СВОДНАЯ МОДЕЛЬ  
РАЗВИТИЯ ПОЖАРА И  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЫМА  
(ВЕРСИЯ 6).**

**Руководство по проверке  
достоверности программного  
обеспечения на основе  
экспериментальных  
исследований**

---

Специальное издание NIST  
2008-19-05

NIST Special Publication  
2008-19-05

CFAST. Consolidated Model of Fire Growth  
and Smoke Transport (Version 6)  
Software and Experimental Validation Guide

ООО «СИТИС»

Перевод документа «CFAST. Сводная модель развития пожара и перемещения дыма (Версия 6). Руководство по проверке достоверности программного обеспечения на основе экспериментальных исследований» выполнен ООО «СИТИС».

© ООО «СИТИС», 2014 (перевод на русский язык)

Не допускается использование данного перевода полностью или частично в составе других документов, документации к программному обеспечению, распространение и публикация в печатном или цифровом виде, без письменного разрешения ООО «СИТИС».

# СОДЕРЖАНИЕ

5. Описание экспериментальных исследований .....	4
5.1 Испытания Национального бюро стандартов США (NBS) в помещении с мебелью .....	4
5.2 Испытания в большом зале, проведённые Центром научно-технических исследований Финляндии .....	5
5.3 Серия испытаний Национального института стандартов и технологий США (NIST) и Национального научно-исследовательского совета (NRC) .....	8
5.4 Серия испытаний, проведённых лабораториями FM/SNL .....	11
5.5 Серия испытаний Национального бюро стандартов США (NBS) в стенде из нескольких помещений .....	13
5.6 Серия испытаний лаборатории FM в стенде из трёх помещений, соединённых коридором .....	15
5.7 Испытания Национального института стандартов и технологий США (NIST) в семиэтажной гостинице .....	16
6. Температура и глубина слоя горячих газов .....	18
6.1 Сравнения «модель – эксперимент» .....	18
6.2 Выводы .....	20
7. Высота пламени, температура восходящей и припотолочной струй .....	20
7.1 Высота пламени .....	20
7.2 Температура дымовой струи .....	20
7.3 Припотолочные струи .....	21
7.4 Выводы .....	22
8. Виды газов и дым .....	22
8.1 Серия испытаний NIST/NRC: кислород и CO <sub>2</sub> .....	22
8.2 Серия испытаний NIST/NRC: дым .....	23
8.3 Выводы .....	23
9. Давление .....	24
10. Тепловой поток и температура поверхности .....	25
10.1 Серия испытаний NIST/NRC: кабели .....	25
10.2 Серия испытаний NIST/NRC: стены, пол и потолок помещения .....	27
10.3 Выводы .....	28
11. Выводы и заключение .....	29

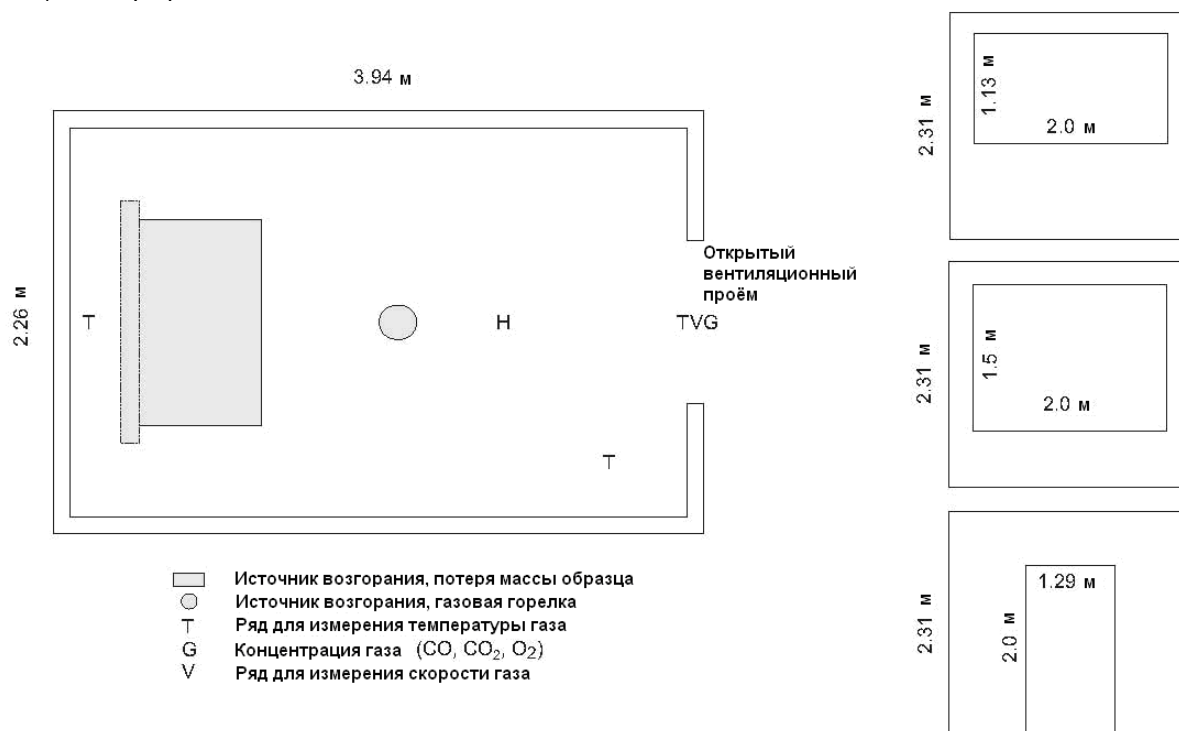
## 5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе описан ряд экспериментов, применявшихся для оценки программы CFAST. Данное исследование посвящено прогнозам модели CFAST, и в него не входит оценка пользовательского интерфейса. Тем не менее, все входные файлы, использованные для расчетов, были подготовлены с помощью графического пользовательского интерфейса и проверены на правильность.

### 5.1 Испытания Национального бюро стандартов США (NBS) в помещении с мебелью

Представленные данные описывают серию пожарных испытаний, проводимых в помещении фиксированного размера с мягкой мебелью и проёмами разных форм и размеров [32]. Эта серия испытаний была выбрана для исследования, поскольку в ней использовались чётко охарактеризованные и реалистичные источники возгорания в простой геометрии одного помещения. Кроме того, широкое разнообразие проёмов представляет сложную задачу для существующих зональных моделей расчета пожара. Максимальная мощность горения составила около 2,9 МВт при общем объеме помещения 21 м<sup>3</sup>. Было проведено четыре испытания, в которых поведение предметов мягкой мебели при горении сравнивалось с данными, полученными в мебельном калориметре для каждого предмета в отдельности. Испытания проводились в стенде из одного помещения; вентиляция осуществлялась через оконные проёмы разных размеров. Комната была оборудована системой дымоудаления с измерительными приборами, находящейся за окном. Во второй серии подобных испытаний также использовался стенд из одного помещения, где источником возгорания служила мебель [57]. При этом задача была усложнена горением стены. Максимальная мощность составила около 7 МВт. Помещение было такого же размера, что и в первой серии испытаний. На рис. 5.1 представлена конфигурация для обеих серий испытаний.

Мебель для первой серии испытаний включала в себя кресло (28,3 кг) или диванчик на двух человек (40,0 кг). И кресло, и диванчик были изготовлены из традиционного деревянного каркаса, пенополиуретановой набивки (в соответствии с минимальными требованиями штата Калифорния к воспламеняемости) и полиолефиновой ткани. Горючими материалами в испытании служили воспламеняющаяся мусорная корзина и один предмет мебели. Для второй серии испытаний мебель в комнате состояла из двуспальной кровати (1,37 м ширина x 1,91 м длина x 0,53 м высота) с изголовьем (2,39 x 0,89 м высота) и тумбочки (0,51 м ширина x 0,41 м глубина x 0,63 м высота). Изголовье кровати и тумбочка были изготовлены из фанеры 12,7 мм толщины. Постельные принадлежности включали в себя две подушки, две наволочки, две простыни и одно одеяло. Подушки изготовлены из полипропиленового волокна с набивкой из полиэстера. Наволочки и простыни изготовлены из полиэстера с хлопком, одеяло - из акрила. Постель оставлена в не заправленном состоянии, которое по возможности повторялось в каждом испытании. Во всех испытаниях пожар начинался с возгорания стоящей рядом с основным горючим предметом мусорной корзины 0,34 кг (240 x 140 x 240 мм высота), заполненной 0,41 кг мусора.



**Рис. 5.1 Горизонтальная и вертикальная проекции стенда для испытаний NBS в комнате с мебелью.**

Примечание. Пунктиром на горящем образце обозначена вертикальная поверхность для испытаний с горящей стеной. Расположение образца и измерительных приборов приближенное.

## 5.2 Испытания в большом зале, проведённые Центром научно-технических исследований Финляндии (VTT)

Испытания описаны в источнике [58]. Серия состояла из восьми испытаний, но из-за повторений включала лишь три уникальных пожарных сценария. Испытания проводились в целях изучения движения дыма в большом зале с наклонным потолком. Использовался зал VTT для пожарных испытаний 19 м высотой, 27 м длиной, 14 м шириной. На рис.5.2 изображены основные характеристики испытательного зала. На рис.5.3 приведены подробные виды экспериментальной установки сверху, сбоку и спереди. Каждое испытание включало в себя одно горение пролива гептана мощностью от 2 до 4 МВт. На рис.5.4 представлена фотография пожара мощностью 2 МВт. При проведении данной оценки использовались четыре типа измерений: средняя высота пламени, температура восходящей струи, температура и глубина слоя горячих газов. Показания трёх вертикальных деревьев термопар и двух термопар в восходящей струе сравнивались с результатами расчёта модели. Температура и высота слоя горячих газов были получены из усреднения по стандартному алгоритму трёх деревьев термопар. Температура припотолочной струи не рассматривалась, поскольку потолок в испытательном зале не плоский, и стандартный алгоритм модели не подходит для данных условий.

Протокол испытаний VTT не содержит всей информации, необходимой для моделирования, поэтому некоторая информация взята из личного общения с научным руководителем Симо Хостикка. Подробности осуществления расчётов, включая информацию о пожаре, помещении и вентиляции, представлены в источнике [59].

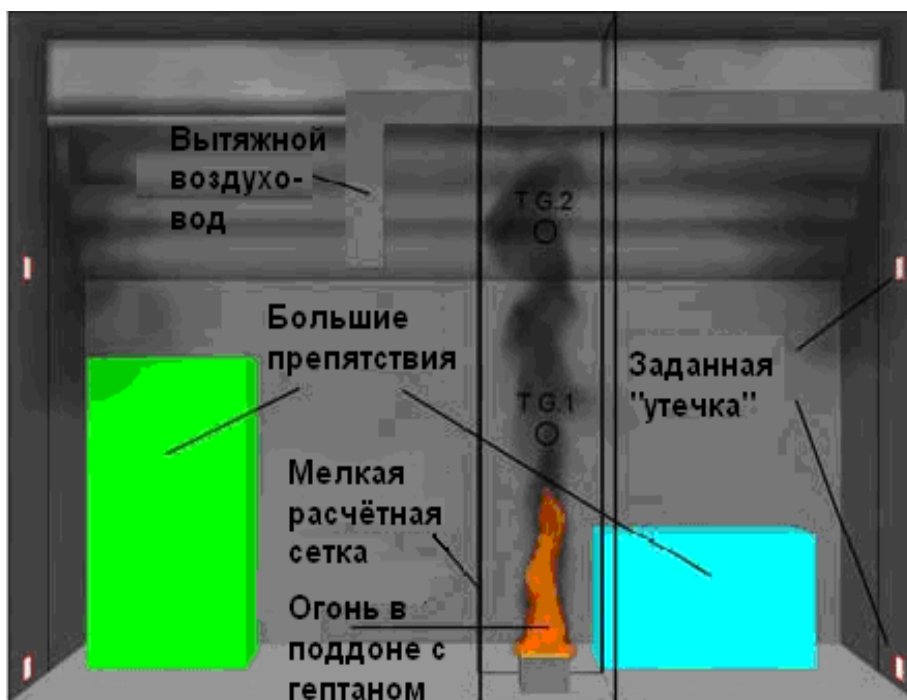
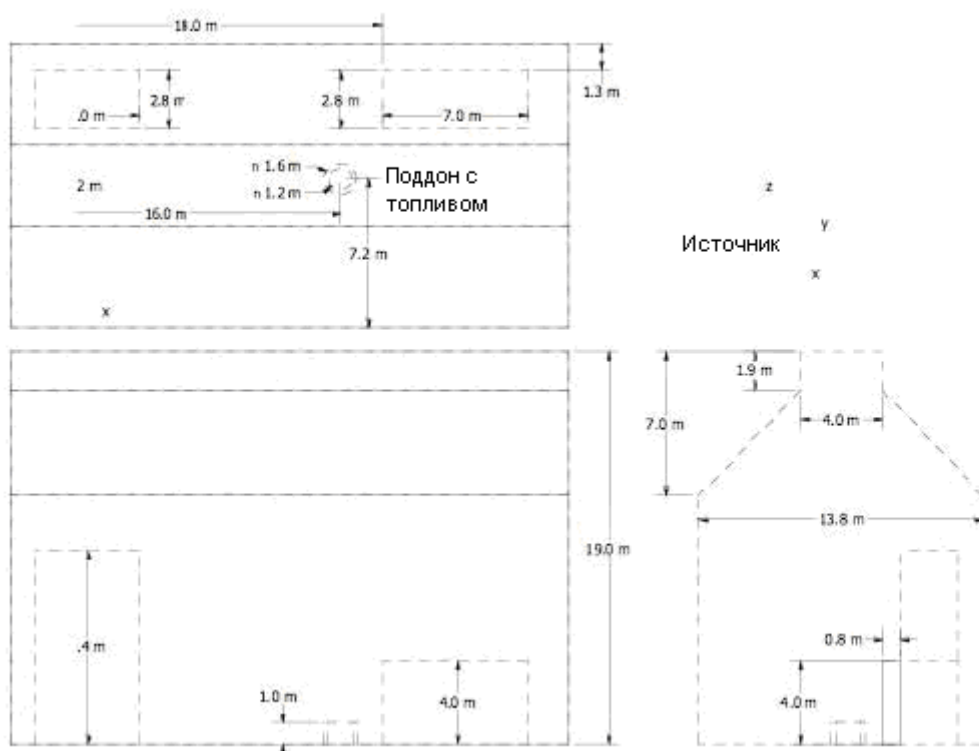


Рис. 5.2 Случай 2 из серии испытаний VTT в большом зале. Разрез



**Рис. 5.3 Экспериментальная установка для пожарных испытаний VTT в большом зале, включая поддон с топливом. Вид сверху, сбоку и спереди**



**Рис. 5.4 Фотография горения гептана мощностью 2 МВт в испытаниях VTT в большом зале. Фотография предоставлена Симо Хостикка (VTT)**

Стены и потолок испытательного зала состоят из слоя листового металла (1 мм) поверх слоя минеральной ваты (5 см). Пол бетонный. В протоколе испытаний не указаны тепловые свойства этих материалов. Теплофизические свойства материалов, использованные в расчётах, приведены в таблице 5.1.

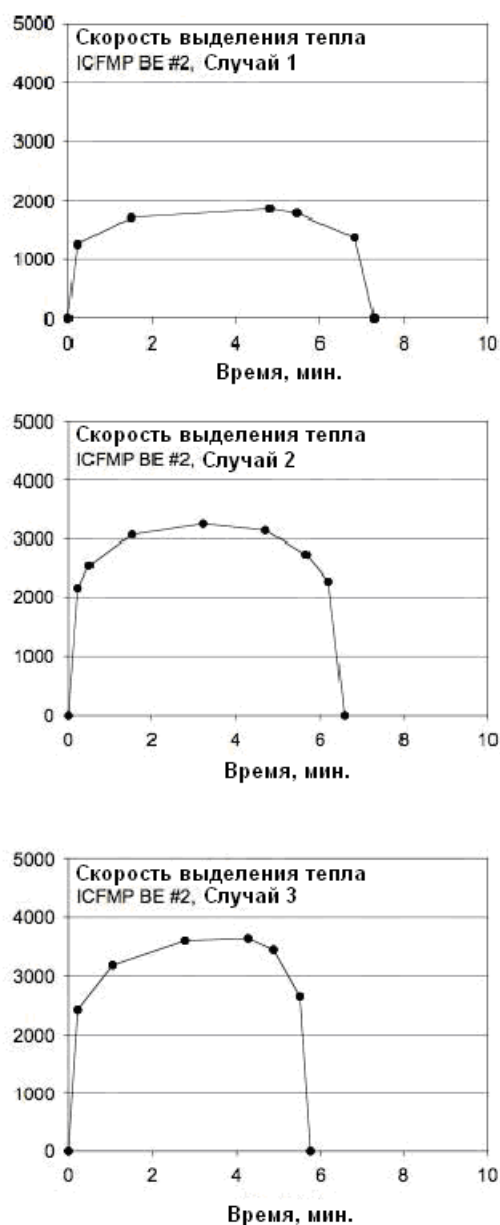
**Таблица 5.1 Теплофизические свойства материалов для испытаний ВТТ в большом зале**

Материал	Теплопроводность (Вт/м°С)	Удельная теплоёмкость (Дж/кг°С)	Плотность (кг/м³)	Толщина (м)	Коэффициент черноты
Сталь ICFMP BE2	54	425	7850	0,001	0,95
Бетон ICFMP BE2	2	900	230	0,15	0,95

В случаях 1 и 2 все двери были закрыты, а вентиляция ограничена просачиванием через ограждающие конструкции здания. Точной информации о просачивании воздуха во время этих испытаний нет. Учёные, проводившие испытания, рекомендуют считать зону утечки общей площадью около 2 м<sup>2</sup>, равномерно распределённую по помещению. В отличие от первых двух случаев, в третьем случае двери, расположенные в каждой торцевой стене (двери 1 и 2, соответственно) были открыты в окружающее пространство. Двери шириной 0,8 м и высотой 4 м расположены так, что их центры располагались в 9,3 м от южной стены. В испытательном зале был один воздуховод принудительной вентиляции, расположенный в пространстве крыши и проходящий по центру здания. Воздуховод имел участок диаметром 1 м и выходил в зал горизонтально на расстоянии 12 м от пола и 10,5 м от западной стены. Механическая вытяжная вентиляция функционировала в случае 3 с постоянным расходом 11 м<sup>3</sup>/с.

В каждом испытании использовался один очаг возгорания, центр которого располагался в 16 м от западной стены и 7,4 м от южной. Во всех испытаниях в качестве топлива использовался гептан в круглом стальном поддоне, частично заполненном водой. В случае 1 поддон был диаметром 1,17 м, а в случаях 2 и 3 – 1,6 м. Во всех случаях поверхность топлива находилась в 1 м от пола. Поддоны были установлены на весы, а скорость выделения тепла рассчитывалась на основе скорости потери массы. Во всех случаях скорость потери массы определялась как среднее по нескольким испытаниям. При определении скорости выделения тепла использовалась теплота сгорания (44,6 кДж/г) и полнота сгорания п-гептана. Хостикка предлагает принять полноту сгорания за 0,8 [58]. Банди определяет полноту сгорания пролива гептана (мощностью 500 кВт) равной 0,97<sup>1</sup> (<sup>1</sup> Мэттью Банди, Национальный институт стандартов и технологий (NIST), Гейтерсберг, штат Мэриленд, США. Беседа в Национальном институте стандартов и технологий США в мае 2005 года об определении полноты сгорания и скорости выделения тепла в пламени распыляемого гептана в Лаборатории по крупным пожарам (Large Fire Laboratory, NIST). С учётом стехиометрии горения и измерений в вытяжном колпаке, при горении распыляемого гептана мощностью 500 кВт полнота сгорания была определена равной 0,97). Теварсон сообщает о значении 0,93 для диаметра пролива в 10 см [60]. Величина полноты сгорания является сложной функцией мощности горения, вентиляции и других воздействий. Рассмотрение химической структуры пламени позволяет предположить, что полнота сгорания должна уменьшаться с ростом мощности горения. Имеющиеся данные подтверждают это предположение [61]. Размер помещения также может влиять на этот параметр, но информации по этому вопросу в литературе очень мало. Таким образом, в данном исследовании нет определённости относительно точного значения полноты сгорания. Основываясь на экспертной инженерной оценке, в данном отчёте для испытаний ВТТ с горением пролива топлива рекомендуется принимать значение полноты сгорания 0,85 ± 0,12 (или ± 14%). Таким образом, погрешность в определении полноты сгорания преобладает в общей погрешности определения скорости выделения тепла. Погрешность в измерении скорости потери массы также влияет на общую погрешность. В результате погрешность в скорости выделения тепла составляет 15%. На рис. 5.5 показана заданная скорость выделения тепла как функция времени для случаев 1-3 соответственно. Доле теплового излучения было присвоено значение 0,35, схожее для многих углеводородов, выделяющих дым [62]. Относительной суммарной расширенной погрешности (2σ) было присвоено значение ±20%, обычное для данного параметра.

Более подробная информация по входным данным модели, использованным для этих расчётов, приведена в источнике [59].



**Рис. 5.5 Заданная скорость выделения тепла как функция времени для испытаний VTT в большом зале**

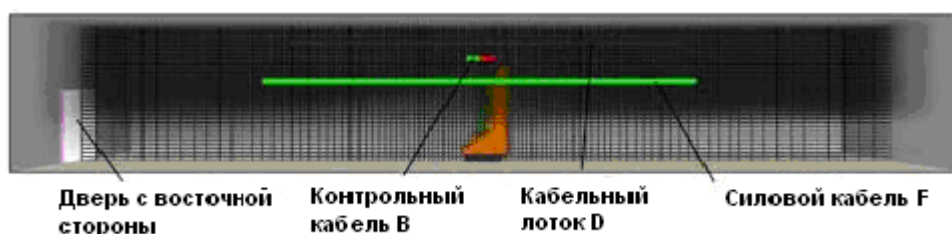
### **5.3 Серия испытаний Национального института стандартов и технологий США (NIST) и Национального научно-исследовательского совета (NRC)**

Данные испытания, спонсором проведения которых выступил Национальный научно-исследовательский совет США (NRC), были проведены в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST) в июне 2003 года и состояли из 15 широкомасштабных исследований. Все 15 испытаний вошли в исследование по проверке достоверности модели. Исследования описаны в источнике [63]. Мощность пожаров варьировалась от 350 кВт до 2,2 МВт в помещении размером 21,7 x 7,1 x 3,8 м (высота), созданном по аналогии с отсеком на атомной электростанции, где находятся силовые и управляющие кабели. Фотография пожара через дверь отсека приведена на рис. 5.6. На рис.5.7 показаны основные особенности испытательного зала.



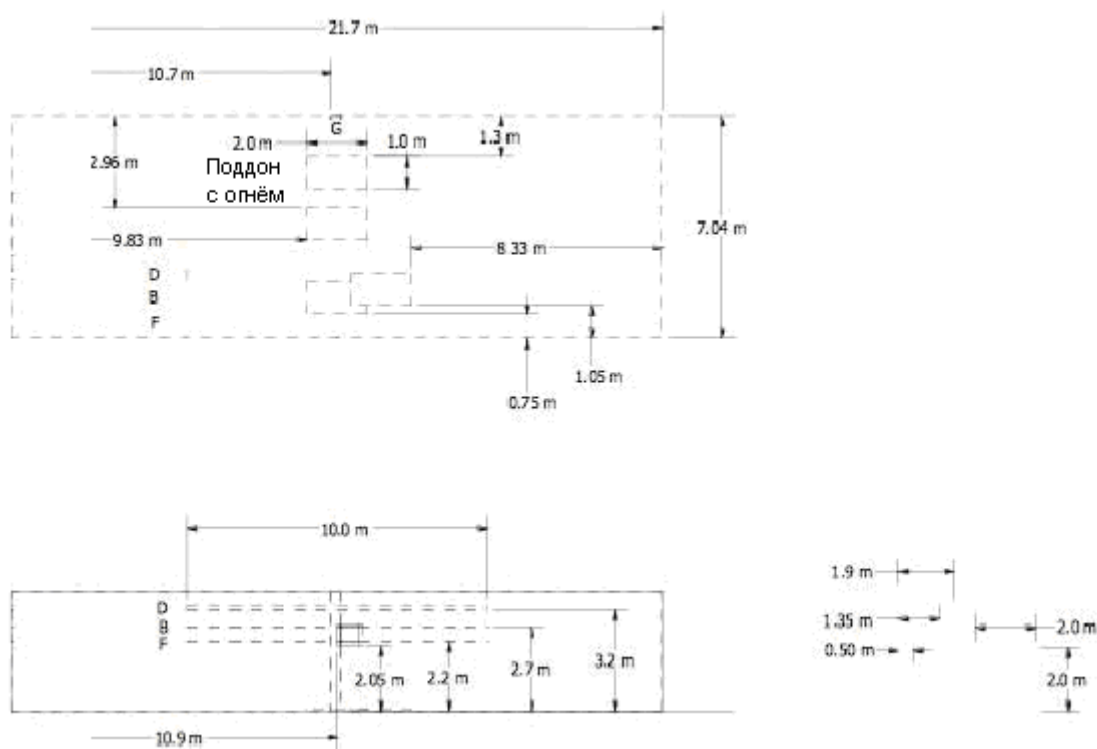


**Рис. 5.6 Фотография горения гептана мощностью 1 МВт через дверной проем. Фотография предоставлена Энтони Хэминс (NIST)**



**Рис. 5.7 Конфигурация испытаний NIST/NRC. Поперечный разрез**

На рис.5.8 приведены подробные виды экспериментальной установки сверху, сбоку и спереди. Стены и потолок были покрыты двумя слоями досок с пропиткой (толщиной 0,0125 м каждый). Пол покрыт слоем гипсокартона поверх слоя фанеры. Теплофизические и оптические свойства пропитки и других материалов, использованных в помещении, указаны в источнике [63]. В комнате была одна дверь и система механической вентиляции. Вентиляционные условия, мощность и расположение огня были различными в разных испытаниях. Проводились многочисленные измерения (примерно 350 на одно испытание), в том числе температуры газа и поверхности, тепловых потоков и скоростей газа. Подробные схемы экспериментальной установки приведены на рис. 5.8.

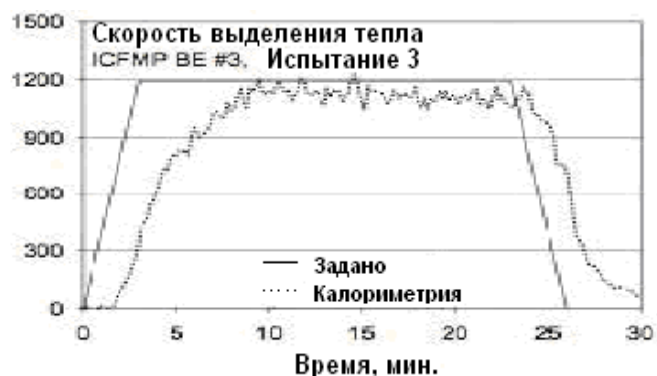


**Рис. 5.8 Экспериментальная установка для испытаний NIST/NRC.**  
**Вид сверху, сбоку и спереди.**  
**Показан поддон с топливом и кабели B, D, F и G (пунктиром)**

В помещении была дверь (2 x 2 м) в середине западной стены. В некоторых испытаниях дверь была закрыта, механической вентиляции не было (испытания 2, 7, 8, 13 и 17), и в этих испытаниях необходимо было учесть измеряемую утечку из помещения. В источнике [63] сообщается о площади утечки, исходя из измерений, проведённых до испытаний 1, 2, 7, 8 и 13. В испытаниях, где дверь была закрыта, площадь утечки, использованная в расчётах, была основана на последнем из имеющихся измерений. Следует отметить, что хронологический порядок испытаний отличался от их цифровой последовательности [63]. Для испытания 4 рекомендовалось использовать площадь утечки, рассчитанную перед испытанием 2. Для испытаний 10 и 16 рекомендовалось использовать площадь утечки, рассчитанную перед испытанием 7.

Механическая вентиляция и дымоудаление использовались в испытаниях 4, 5, 10 и 16, обеспечивая примерно пятикратный воздухообмен. Дверь была закрыта в испытаниях 4 и открыта в испытаниях 5, 10 и 16. Приточная вентиляция была расположена на южной стене в 2 м от пола. Вытяжной воздуховод, равный по площади приточному, был расположен на противоположной стене в соответствующем месте. Скорости потока в приточном и вытяжном воздуховодах измерялись во время перерывов в испытаниях, в отсутствие огня. Во время испытаний потоки отслеживались с помощью одиночных двунаправленных датчиков.

Для распыления жидкого углеводородного топлива в огневой поддон размером 1 x 2 м и глубиной около 0,02 м использовался один распылитель. Изначально в плане испытаний предполагалось использование двух распылителей топлива, однако предварительные наблюдения показали, что огонь более устойчив при использовании одного распылителя. Кроме того, согласно наблюдениям, реальный масштаб пролива жидкости приблизительно равнялся метровому кругу в центре поддона. В целях безопасности поток топлива прекращался, когда объёмное содержание кислорода в самом нижнем слое уменьшалось приблизительно до 15%. Топливом, используемым в 14 испытаниях, был гептан, а в одном испытании применялся толуол. Скорость выделения тепла была определена с использованием калориметрии потребления кислорода (на рис. 5.9 представлен пример скорости выделения тепла для одного из испытаний серии).



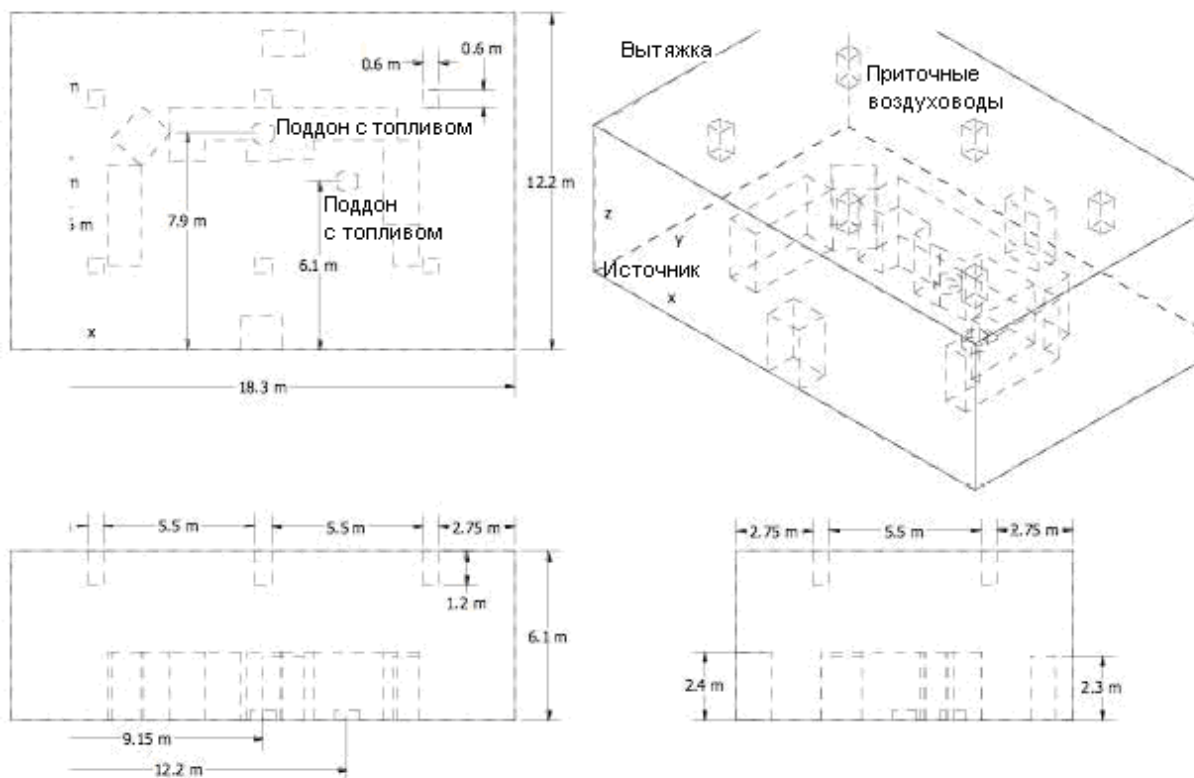
**Рис. 5.9** Прогнозируемые и измеренные значения скорости выделения тепла как функция времени в ходе Испытания 3 серии испытаний NIST/NRC

Рекомендуемые значения погрешности составили 17% для всех испытаний. Доля теплового излучения измерялась в отдельном исследовании с применением тех же видов топлива и той же распылительной горелки, что и в серии испытаний [64]. Значение доли теплового излучения и её погрешность составили  $0,44 \pm 16\%$  и  $0,40 \pm 23\%$  для гептана и толуола соответственно.

Более подробная информация по входным данным модели, использованным в этих расчётах, приведена в источнике [59].

#### 5.4 Серия испытаний, проведённых лабораториями FM/SNL

Серия испытаний FM/SNL состояла из 25 пожарных испытаний, проведённых в 1985 году для Национального научно-исследовательского совета США (NRC) научно-исследовательским обществом «Factory Mutual Research Corporation (FMRC)» под руководством «Sandia National Laboratories (SNL)». Основной целью этих испытаний было обеспечение данными, с помощью которых можно проверить достоверность компьютерных моделей для различных типов помещений АЭС. Испытания проводились в помещении размером 18 x 12 x 6 м, сконструированном в здании для пожарных испытаний FMRC в штате Род-Айленд. На рис. 5.10 приведены подробные схематичные изображения помещения в разных проекциях. Серия испытаний, проведённых FM/SNL, подробно описана в источниках [65, 66], включая информацию о типах и местах расположения измерительных приборов, а также о некоторых результатах.



**Рис. 5.10** Экспериментальная установка в серии испытаний лаборатории FM/SNL, включая приточные и вытяжные воздуховоды и поддон с топливом. Вид сверху, сбоку и спереди

Для моделирования условий, характерных для установок атомной электростанции, во всех испытаниях применялась принудительная вентиляция. Четыре испытания проводились с использованием макета диспетчерской в натуральную величину. В ходе испытаний варьировалась интенсивность горения, расход воздуха и место расположения огня.

В данном исследовании использовалась информация по трём испытаниям (4, 5 и 21). Источником огня в них служила газовая горелка диаметром 0,91 м, работающая на пропиле. В испытаниях 4 и 5 горелка располагалась по центру вдоль продольной оси в 6,1 м от ближайшей стены, а край горелки находился примерно в 0,1 м от пола. В испытании 21 источник огня находился внутри смоделированного пульта управления шкафа электроавтоматики.

Значение скорости выделения тепла определялось с помощью калориметрии потребления кислорода в вытяжной трубе с поправкой, принятой для CO<sub>2</sub> в верхнем слое помещения. Погрешность массового расхода топлива не была зафиксирована в документах. Все три испытания, отобранные для данного исследования, имели одинаковое значение максимальной скорости выделения тепла, равное 516 кВт. Увеличение скорости выделения тепла происходило в течение 4 минут по квадратичному закону. Протокол испытания содержит данные об изменении скорости выделения тепла, в которых средняя устойчивая скорость выделения тепла составила 510 кВт, 480 кВт и 470 кВт в испытаниях 4, 5 и 21 соответственно. После достижения максимальной скорости выделения тепла, её поддерживали на постоянном уровне в течение шести минут в испытаниях 4 и 5 и шестнадцати – в испытании 21. На рис. 5.11 показаны заданная и измеренная в ходе испытания 21 [65] скорости выделения тепла. В расчётах модели использованы заданные, а не измеренные кривые, поскольку поток топлива сохранялся постоянным, тогда как в калориметрических измерениях ожидаются колебания скорости выделения тепла. Кроме того, некоторые опасения касались качества измерения скорости выделения тепла, поскольку согласно протоколу испытания в ходе испытаний 4, 5 и 21 наблюдалось занижение измеряемых значений из-за значительной потери газов из вытяжного колпака. Эта погрешность измерения рассматривалась как дополнительная погрешность, и относительная суммарная расширенная погрешность составила  $\pm 20\%$ , что несколько превышает стандартную погрешность калориметрических измерений. Доля теплового излучения не измерялась в ходе испытания, но для данного исследования предполагалось, что она равна 0,35 (характерное значение для углеводородов, выделяющих дым) [67, 60]. Расширенная погрешность в этом значении была принята за  $\pm 20\%$  - значение, характерное для погрешности, о котором сообщается в протоколах исследований [64, 62]. Более того, предполагалось, что доля теплового излучения была примерно одинаковой в испытании 21 и других испытаниях, поскольку горение топлива должно было происходить снаружи шкафа электроавтоматики, в котором была помещена горелка.



**Рис. 5.11 Прогнозируемые (пунктир) и измеренные (сплошная линия) значения скорости выделения тепла как функция времени в ходе Испытания 21 серии испытаний лабораторий FM/SNL**

В ходе серии испытаний FM/SNL было проведено четыре типа измерений, которые используются в данном исследовании по оценке достоверности модели, в том числе температура и глубина слоя горячих газов, температура восходящей и припотолочной струй. Для проведения всех температурных измерений использовались аспирационные термопары. Как правило, аспирационные термопары предпочтительнее неизолированных, поскольку снижают систематическую погрешность измерения обмена излучением. Однако, при относительно низких наблюдаемых температурах ( $<100$  °C) ожидается, что разница будет мала.

Измерения температур с помощью аспирационных термопар обычно дают точные значения вплоть до нескольких градусов (°C). Такие измерения проводились в секторах 1, 2 и 3 помещения. Кроме того, в испытаниях 4 и 5 несколько термопар было расположено под потолком прямо над горелкой.

Данные со всех вертикальных деревьев термопар использовались при определении снижения высоты и температуры слоя горячих газов. Для испытаний FM/SNL 4 и 5 использовались сектора 1, 2 и 3 (с равными весовыми коэффициентами). Для испытания 21 использовались сектора 1 и 3 (с равными весовыми коэффициентами). В испытании 21 сектор 2 находился частично внутри пламени.

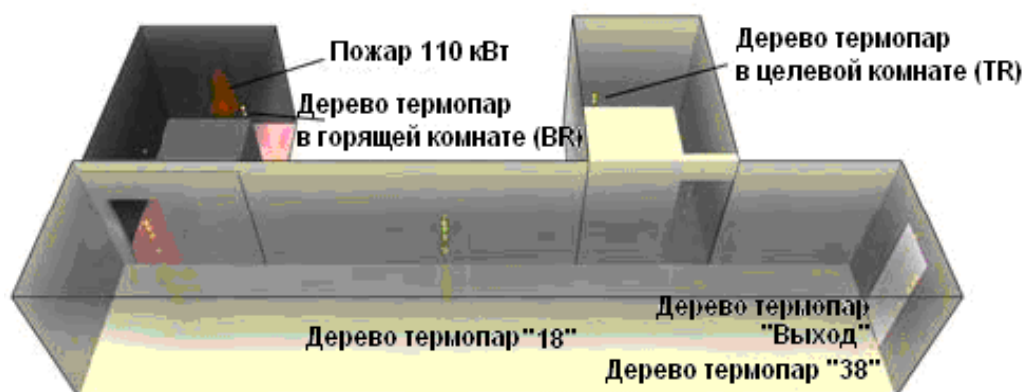
### 5.5 Серия испытаний Национального бюро стандартов США (NBS) в стенде из нескольких помещений

Национальное бюро стандартов США (NBS), которое в настоящее время называется Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST), провело серию пожарных испытаний в стенде из нескольких помещений. Серия состояла из 45 испытаний с 9 разными комбинациями условий. Испытания проводились в 1985 году и подробно описаны в источнике [68]. Стенд состоял из двух относительно небольших помещений, соединённых между собой достаточно длинным коридором. Общий объём помещений составлял примерно 100 м<sup>2</sup>. Источником пожара служила газовая горелка, расположенная у задней стены одного из помещений, как показано на рис.5.12. На рис.5.13 и 5.14 представлены схематичные изображения стенда сверху, сбоку и спереди. Испытания проводились при мощности пожара 100, 300 и 500 кВт. Для данного исследования использовано только три испытания мощностью 100 кВт: испытание 100A из комбинации условий 1, 100O из комбинации 2 и 100Z из комбинации 4. Отобранные данные также представлены в источнике [69]. В источнике [59] содержится информация, использованная в качестве входных данных модели испытаний NBS, включая информацию о помещении, источнике горения, вентиляции и окружающих условиях.



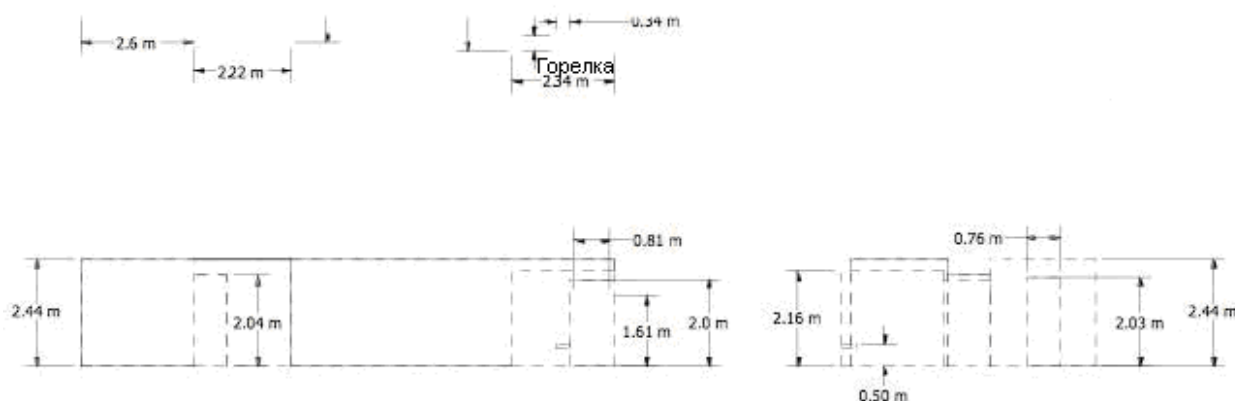
**Рис. 5.12 Фотография пожара мощностью 100 кВт, горелка расположена у задней стены одной из небольших комнат (серия испытаний NBS в стенде из нескольких комнат)**

Из серии испытаний NBS в стенде из нескольких помещений для данного исследования были отобраны испытания 100A, 100O и 100Z, поскольку они успешно использовались в предшествующем исследовании по проверке достоверности [69], и поскольку у этих испытаний самые стабильные значения скорости выделения тепла во время периода устойчивого горения. Данные в серии испытаний NBS собирались каждые 10 секунд и усреднялись с периодом 6 секунд. Интервал для усреднения несколько меньше, чем во всех остальных сериях испытаний, где он составлял 10 секунд.



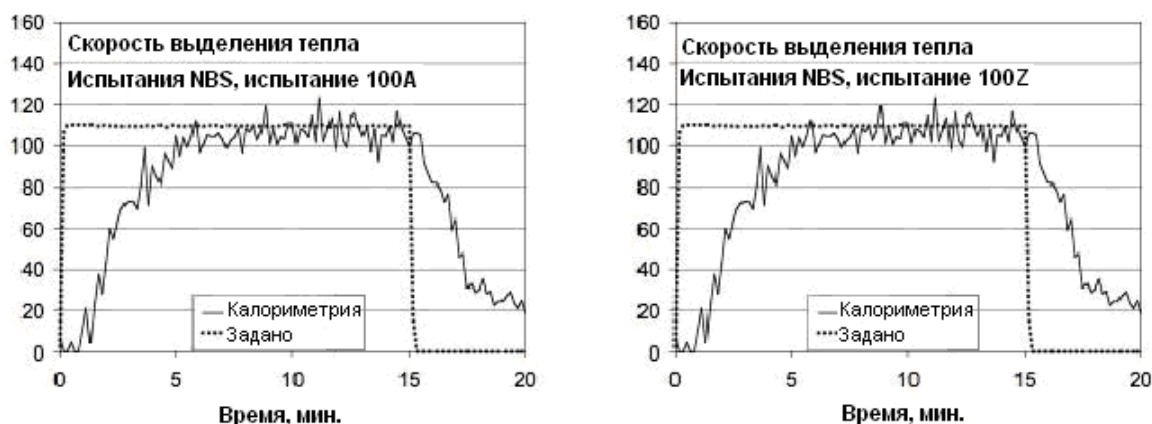
**Рис. 5.13 Обзор конфигурации для испытаний NBS**





**Рис. 5.14 Экспериментальная установка для испытаний NBS, включая горелку. Вид сверху, сбоку и спереди**

На рис. 5.15 показано измеренное в ходе испытаний 100А и 100Z значение тепловыделения как функции времени, составившее в среднем 100 кВт. В этих двух испытаниях с открытой дверью значение тепловыделения во время устойчивого горения, измеренное посредством калориметрии потребления кислорода, составило  $110 \text{ кВт} \pm 17 \text{ кВт}$  ( $\pm 15\%$ ). Суммарной относительной расширенной погрешности ( $2\sigma$ ) в калориметрических измерениях тепловыделения присваивается значение  $\pm 15\%$ , которое согласуется с дополнительными измерениями и погрешностью, характерной для калориметрии потребления кислорода. Кроме того, значение согласуется с колебанием измерений, показанных на рисунках. Предполагалось, что в испытании с закрытой дверью (испытание 100О) было такое же тепловыделение, как в испытаниях с открытыми дверями.



**Рис. 5.15 Заданная и измеренная скорость выделения тепла как функция времени в ходе испытаний 100А и 100Z из серии испытаний NBS в помещении из нескольких комнат**

Заданное значение тепловыделения также отражено на графиках. Массовый расход топлива (природный газ в испытании 100А или смесь природного газа с ацетиленом в испытаниях 100О и 100Z) не замерялся; вместо этого поток газов захватывался колпаком, закрепленным над открытой дверью в коридоре, и измерялся с помощью калориметрии потребления кислорода. Способ, которым контролировался поток топлива, не отражен в документах. В испытании 100А для увеличения дыма в верхнем слое использовались свечи с целью улучшения визуализации. В испытаниях 100О и 100Z для создания дыма использовался ацетилен (около 20% объёма). В этих испытаниях поток природного газа и ацетилена был скорректирован так, чтобы получить приблизительно такое же значение тепловыделения, как в испытании 100А. Добавление ацетилена увеличило долю теплового излучения огня.

Из практических соображений в пожарных испытаниях часто используется передаваемый по трубам природный газ. Хотя его состав может варьироваться день ото дня, это изменение мало влияет на долю теплового излучения. Как указано выше, природный газ применялся в качестве топлива в испытании 100А. В испытаниях 100О и 100Z к природному газу был добавлен ацетилен для увеличения выделения дыма, и, как следствие, увеличилась доля теплового излучения. Долю теплового излучения природного газа изучали ранее, в то время как доля теплового излучения смеси природного газа с ацетиленом не была изучена. Доле теплового излучения от огня на природном газе было присвоено значение 0,20, от огня на смеси природного газа с ацетиленом - 0,30 [62].

Относительной суммарной расширенной погрешности ( $2\sigma$ ) в этом параметре было присвоено значение  $\pm 20\%$  в испытании 100А и  $\pm 30\%$  в 100О и 100Z. 20%-ое значение согласуется с характерными значениями для измеренной доли теплового излучения в литературе. В испытаниях 100О и 100Z использовалось значение на 50% выше, поскольку влияние добавления ацетилена к природному газу на долю теплового излучения не

измерялось.

Измерения, выполненные в ходе серии испытаний NBS, включали в себя температуру газа и поверхности, давление, концентрацию дыма и основных видов газов, скорости газа в дверном проёме. Только два типа измерений, проведённых в ходе серии испытаний NBS, использовались при рассматриваемой здесь оценке: поскольку относительно других измерений было меньше уверенности. Измерения, рассматриваемые здесь: температура и глубина слоя дымовых газов, для которых использовались неизолированные термопары. Точечные измерения температуры внутри горящего помещения при оценке алгоритмов расчета восходящей и припотолочной струй не применялись, поскольку ни в одном из случаев геометрия не согласовывалась с допущениями, используемыми в алгоритме модели для струй. Так, горелка была установлена у стены, а отношение ширины и высоты помещения было меньше допустимого.

## 5.6 Серия испытаний лаборатории FM в стенде из трёх помещений, соединённых коридором

В данном разделе описана серия испытаний, проводимых в стенде с большим числом комнат и более сложными пожарами, чем от газовой горелки в предшествующих случаях. Это исследование [70] было включено в руководство, поскольку оно во многом схоже с исследованием движения дыма, проведённым в Национальном бюро стандартов США (NBS) [68], и позволяет провести сравнение между двумя разными лабораториями. Кроме того, данное исследование вносит дополнения, предоставляя информацию о более мощных пожарах в конфигурации нескольких помещений с коридором. Мощность пожара достигала 1 МВт, а общий объём стенда составил 200 м<sup>3</sup>.

Предыдущие пожарные испытания, используемые для сравнения с пожарными моделями, проводились в одном помещении с естественной вентиляцией через открытые двери и окна, выходящие в большое пространство. Данное исследование проводилось для сбора данных о различных источниках возгорания, вентиляции и геометрии, особенно для ситуаций с закрытыми дверями. Эта программа испытаний реализовывалась в научно-исследовательском обществе «Factory Mutual Research Corporation (FMRC)» (Вест Глостер, штат Род-Айленд), где 60 пожарных испытаний проводились в стенде из нескольких помещений с целью получения данных для проверки достоверности теоретических моделей пожара.

На рис. 5.16 изображена схема стенда с указанием размещения контрольно-измерительного оборудования. Стенд был выстроен на этаже здания для пожарных испытаний FMRC, с использованием части здания размером 67 x 76 м и высотой потолка – 18,3 м. План на рис. 5.16 показывает горящую комнату и две целевые комнаты, соединённые коридором. Размеры коридора составили 2,43 м (ширина) x 18,89 м (длина) x 2,43 м (высота); размеры горящего помещения – 3,63 м (глубина) x 3,64 м (ширина) x 2,45 м (высота); уплотнённый оконный проём размером 0,85 x 0,85 м находился по центру задней стены в 0,34 м от потолка, а открывающаяся в коридор дверь размером 0,92 x 2,05 м (высота) – по центру передней стены. Для испытаний с закрытым окном оконная крышка из силиката кальция в деревянной раме прижималась к полосе чеканки вокруг стальной оконной рамы и придерживалась откидной решёткой, вставленной в пазы на внешней стене.

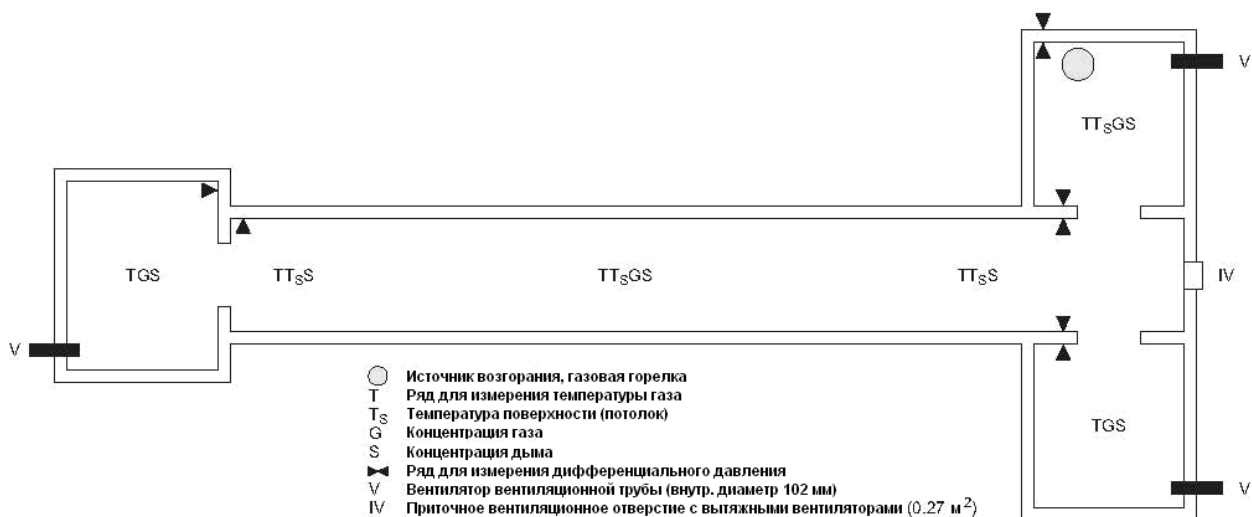


Рис. 5.16 Обзор серии испытаний лаборатории FM в стенде из трех комнат с коридором

Комната 3, расположенная напротив горящей комнаты, размером 3,65 м (глубина) x 3,64 м (ширина) x 2,45 м (высота); дверь размером 0,88 м x 2,02 м (высота) по центру передней стены (выходящая в коридор). Комната 4, расположенная на противоположном конце коридора, размером 3,65 м (глубина) x 3,65 м (ширина) x 2,43 м (высота) с открывающейся в коридор дверью размером 0,88 x 2,02 м (высота) по центру передней стены; ниша для наблюдений размером 1,28 x 0,86 x 1,99 м (высота) в переднем углу комнаты 4. Каждая комната была оборудована вентиляционной трубой с внутренним диаметром 102 мм, диафрагменным расходомером с внутренним диаметром 61 мм, и термопарой, а также была возможность использовать вытяжной вентилятор (труба размещена по центру в 0,27 м от пола и 0,17 м от ближайшей параллельно расположенной стены). Приточное вентиляционное отверстие (0,29 м<sup>2</sup>), применяемое с вытяжными вентиляторами, было расположе-

но по центру в 0,43 м от пола в конце коридора между горячей комнатой и комнатой 3. Когда приточное вентиляционное отверстие не использовалось, его запечатывали крышкой из гипсокартона с помощью клейкой ленты.

Двери целевых комнат были стандартными противопожарными (облицованные деревом составные двери с основой из силиката кальция, огнестойкость - 14 часов), установленными на рамах из 16-миллиметровой стали. Дверь горящего помещения была изготовлена из 12,7-миллиметрового силиката кальция и вставлена в стальную раму, облицованную силикатом кальция. Более подробная информация о дверях и неплотностях (щелях) приведена в источнике [70].

Гипсовая стеновая плита толщиной 12,7 мм на деревянном каркасе использовалась во всём испытательном помещении. Кроме того, стены и потолок горячей комнаты были покрыты силикатом кальция (также толщиной 12,7 мм) для защиты от повторных воздействий пожара. Использовался существующий пол здания для испытаний.

Использовались три типа источников горения:

1) устойчивое горение пропилена мощностью 56 кВт на горелке (песколовке) диаметром 0,30 м и 522 кВт на горелке диаметром 0,91 м;

2) горение пропилена на горелке диаметром 0,91 м, запрограммированное при компьютерном контроле на рост с квадратом времени, с превышением в 1 МВт за 1, 2, 4 или 8 мин;

3) естественным образом разрастающийся пожар в конфигурации так называемого «стандартного пластмассового изделия» - испытательного топлива лаборатории «Factory Mutual», состоящего из гофроящиков с полистироловыми контейнерами в отсеках (только в испытании 60 – не обсуждается в данном отчёте).

В большинстве испытаний применялась горелка диаметром 0,91 м и 0,58 м высотой. Она состояла из контейнера из 12-миллиметровой стали с газораспределителем у основания, заполненного галькой на 67% высоты, где находился экран из проволоочной сетки, и крупнозернистым песком на полную высоту горелки. Горелка диаметром 0,30 м имела точно такую же конструкцию, но меньшего размера.

### **5.7 Испытания Национального института стандартов и технологий США (NIST) в семиэтажной гостинице**

По многим параметрам это самое сложное испытание, и представленные здесь данные являются частью серии полномасштабных испытаний, проведенных для оценки зональных систем дымоудаления с подпором воздуха в лестничное пространство и без подпора [71]. Испытания проводились в семиэтажной гостинице с большим количеством комнат на каждом этаже и лестницей, соединяющей все этажи. Эти данные были выбраны, поскольку они выходят за пределы возможностей большинства существующих моделей пожара. Измеренные температуры и перепад давлений между комнатами и этажами здания являются исчерпывающими и не противоречат друг другу. Максимальная мощность пожара составила 3 МВт при общем объёме здания 140 000 м<sup>3</sup>.

Движение дыма и функционирование систем дымоудаления изучались в семиэтажном здании гостиницы с помощью дыма, полученного от горения дерева, и от дымовых шашек. Всего было проведено 12 испытаний в разных условиях: пожары двух мощностей; пожары при работе спринклеров и без них; при включенной и выключенной системе зонального дымоудаления; при подпоре воздуха в лестничное пространство и без подпора; с вентиляцией наружу и без неё; с открытыми и закрытыми дверями.

Здание гостиницы «Plaza Hotel» представляло собой кирпичную конструкцию, состоящую из двух частей – трёхэтажной и семиэтажной. Эти части были выстроены в разное время и соединены между собой только в одном месте на каждом этаже. Соединения были герметично запечатаны, испытания проводились на втором этаже семиэтажного крыла, а трёхэтажное крыло использовалось в качестве контрольно-измерительной зоны. Области с пожаром на втором этаже были защищены для снижения повреждений конструкций здания.

Системы дымоудаления были спроектированы с использованием методов, описанных в руководстве по дымоудалению Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) [72], и проектный расчёт подробно обсуждается Клоутом в источнике [73]. Минимальный расчётный перепад давления составил 25 Па, означавший, что система должна быть способна поддерживать, по меньшей мере, это значение в отсутствие пожара. В здании «Plaza Hotel» не было системы центрального отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, поэтому была установлена специальная система вентиляторов и воздуховодов для зонального дымового контроля и подпора воздуха в лестничное пространство. Система дымоудаления состояла из трёх центробежных вентиляторов (0,944 м<sup>3</sup>/с), изображённых на рис. 5.17, и ещё одного центробежного вентилятора (не изображённого на рисунке), расположенного снаружи и нагнетающего воздух (4,25 м<sup>3</sup>/с) в лестничное пространство у первой двери. Система дымоудаления изображена на рис.5.17. Все испытательные пожары проходили в дымовой зоне второго этажа. Этот дым удалялся с шестикратным воздухообменом. Нагнетание воздуха в первый и второй этажи происходило примерно с шестикратным воздухообменом. Когда активировалась система подпора воздуха в лестничное пространство, дверь наружной лестницы была открыта. Такой подход помогал уменьшить колебания, вызываемые открытием и закрытием дверей.





## 6. ТЕМПЕРАТУРА И ГЛУБИНА СЛОЯ ГОРЯЧИХ ГАЗОВ

Пожалуй, наиболее часто задаваемый вопрос, касающийся пожара, звучит так: «Насколько там поднялась температура?» Температура в верхней части помещения является очевидным показателем, дающим ответ на этот вопрос. Максимальная температура, время достижения максимальной или выбранной температуры являются значениями, обычно представляющими интерес. Гораздо сложнее количественно определить качество прогнозирования (или измерения) положения границы дымового слоя. Хотя в ряде испытаний действительно наблюдается разделение на два слоя, во многих случаях такое допущение принимается лишь из соображений удобства моделирования.

При оценке безопасности осмысленным критерием может служить время опускания слоя до выбранного уровня (предполагается, что некоторым людям в помещении придётся в этом случае либо ползти под границей слоя газов, чтобы дышать чистым воздухом возле пола, либо дышать газами из верхних слоёв). На согласованность также может указывать использование минимальных значений. Для испытаний в одной комнате с горячей мебелью или стенами, они являются подходящими показателями для сравнения модели и испытания. Для испытаний наиболее приближенных к установившемуся режиму в стендах из двух или трёх комнат с коридором или в многоэтажных зданиях среднее значение в установившемся режиме лучше характеризует природу эксперимента.

Точность прогноза высоты дымового слоя во многом зависит от точности прогноза его температуры, поскольку дым и тепло в основном перемещаются вместе, и большинство численных моделей описывают перемещение тепла и дыма с помощью одного алгоритма. Как правило, программа CFAST прогнозирует слегка завышенное значение температуры слоя горячих газов, чаще всего в пределах экспериментальной погрешности. При испытаниях с хорошей вентиляцией высота слоя обычно находится в пределах экспериментальной погрешности, а в испытаниях, где помещения закрыты от внешнего мира и плохо вентилируются, слой приближается к уровню пола. Для определения высоты слоя горячих газов применяются значения только тех испытаний, в которых дверь открыта. Наблюдения за испытаниями, в которых дверь закрыта, обычно свидетельствуют о том, что слой горячих газов заполняет всё помещение от пола до потолка, что не соответствует результатам расчёта по экспериментальным данным. Таким образом, рассчитанные экспериментальные значения высоты слоя для испытаний с закрытыми дверями считаются неподходящими для сравнения с результатами модели.

Обратите внимание, что расчёт относительной разности основан на увеличении температуры по сравнению с температурой окружающей среды, и глубине дымового слоя, т.е. расстоянии от потолка до того уровня, на который опускается слой горячих газов. В случаях, когда модель завышает значение температуры или глубины слоя, относительная разность имеет положительное значение. Это правило используется на протяжении всего данного отчёта: там, где модель даёт завышенное значение тяжести пожара, относительная разность имеет положительное значение; там, где модель даёт заниженный прогноз, разность имеет отрицательное значение.

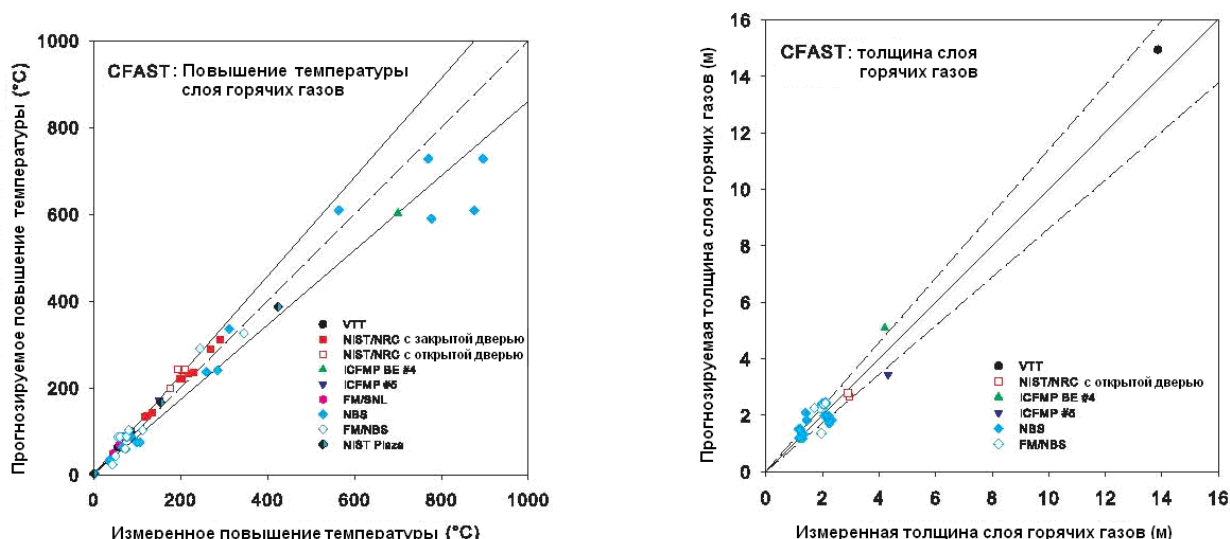


Рис. 6.1 Сравнение прогнозируемых и измеренных значений температуры и высоты слоя горячих газов

### 6.1 Сравнения «модель – эксперимент»

На рис. 6.1 приведено сравнение прогнозируемых и измеренных значений температуры и глубины слоя горячих газов. В Приложении А приведены отдельные графики моделируемых и экспериментальных значений.

Ниже приводятся выводы касательно точности прогнозирования температуры и глубины слоя горячих газов в шести сериях испытаний:

### **Испытания VTT в большом зале**

Температура и глубина слоя горячих газов вычислялись на основе усреднённых значений температуры газа, полученных тремя вертикальными рядами термопар с использованием стандартного метода редукиции. В каждом вертикальном ряду было 10 термопар, расположенных в 2 м друг от друга в нижних двух третьих зала, и в 1 м друг от друга под потолком.

Во всех трёх испытаниях программа CFAST прогнозирует температуру и высоту слоя горячих газов в пределах экспериментальной погрешности.

### **Серия испытаний NIST/NRC.**

Серия испытаний NIST/NRC состояла из 15 испытаний с пожарами на основе распыляемой жидкости с разными скоростями выделения тепла, местами расположения поддона и условиями вентиляции. Температура газов измерялась с использованием семи рядов («деревьев») термопар, расположенных от пола до потолка, распределённых по всей комнате. Средние значения температуры и высоты слоя горячих газов рассчитывались с помощью деревьев термопар 1, 2, 3, 5, 6 и 7. Дерево 4 не использовалось, поскольку одна из его термопар (4-9) работала неисправно в ходе большинства экспериментов.

Ниже приведены некоторые наблюдения о расчётах:

- В испытаниях с закрытой дверью слой горячих газов опускался до самого пола. Однако метод редукиции, применённый к измеренным температурам, не учитывает образование единого слоя и поэтому не показывает, что слой опустился до самого пола. Это не является недостатком измерений, скорее это недостаток метода редукиции данных.
- Метод редукиции слоя горячих газов даёт ложные результаты в первые несколько минут каждого испытания, поскольку ещё не сформирован чёткий слой.

Программа CFAST прогнозирует температуру слоя горячих газов в пределах экспериментальной погрешности для всех испытаний с закрытой дверью, за исключением испытания 17. В испытании 17 был быстро растущий пожар пролива толуола. Испытание было прекращено из соображений безопасности спустя 273 секунды. Программа CFAST прогнозирует начальный подъём температуры чуть раньше, а максимальное значение чуть выше, чем экспериментальные значения, но формы кривых совпадают во всех испытаниях. Относительная разность для испытаний с открытой дверью чуть выше и находится в пределах от 13% для испытания 5 до 26% для испытания 18. Программа CFAST прогнозирует высоту слоя в пределах экспериментальной погрешности для испытаний с открытой дверью. Для испытаний с закрытой дверью вычисленные с помощью программы CFAST значения соотносятся с визуальными наблюдениями заполнения комнаты дымом.

### **Серия испытаний лабораторий FM/SNL**

Для сравнения выбраны испытания 4, 5 и 21 из серии испытаний лабораторий FM/SNL. Температура и высота слоя горячих газов рассчитаны с использованием стандартного метода. Для испытаний 4 и 5 среднее значение определялось по секторам термопар 1, 2 и 3 (с равными весовыми коэффициентами). Для испытания 21 в усреднении участвовали только сектора 1 и 3, поскольку сектор 2 попадал в зону дымовой струи.

Обратите внимание на следующее:

- Воздействие вентиляции вносит «шумовые» помехи в экспериментальную высоту слоя горячих газов. Прогнозируемые высоты ниже соответствующих экспериментальных, которые к концу испытания обычно приближаются к уровню пола. Вероятно, это сочетание методики обработки экспериментальных измерений и правил для потока от механической вентиляции в модели CFAST.
- Вентиляция была отключена через 9 минут в испытании 5, результатом чего стало небольшое повышение измеряемой температуры слоя горячих газов.

Программа CFAST прогнозирует температуру слоя горячих газов в пределах экспериментальной погрешности для испытаний 4 и 5. В испытании 21 наблюдается завышение прогнозируемого значения на 33%. Вероятно, это объясняется конфигурацией пожара, когда огонь находится внутри шкафа в горящем помещении. Такая сложная геометрия приводит к взаимодействию между огнём и ограничивающим его шкафом, которое зональная модель не может воспроизвести.

### **Серия испытаний NBS в стенде из нескольких помещений**

Эта серия испытаний проводилась в стенде из двух относительно небольших помещений, соединённых длинным коридором. Пожар происходит в одном из помещений. Восемь вертикальных рядов термопар расположены по всему испытательному стенду: один – в горящем помещении, один – рядом с дверью горящего помещения, три – в коридоре, один – снаружи выхода в дальнем конце коридора, один – рядом с дверью другого («целевого») помещения и один – внутри целевого помещения. Для сравнения с прогнозом модели выбраны четыре из восьми рядов: ряд в горящем помещении (BR), ряд в середине коридора (5,5 м от BR), ряд в дальнем конце коридора (11,6 м от BR) и ряд в целевом помещении (TR). В испытаниях 100A и 100O целевое помещение закрыто – в этом случае используется ряд на выходе (EXI). Руководитель испытаний рассчитал данные для слоя по каждому из восьми рядов термопар в отдельности, используя альтернативный метод. Эти результаты включены в исходные данные. Однако, для данного исследования по проверке достоверности модели CFAST, выбранные деревья термопар были преобразованы с использованием метода, применяемого во всех рассматриваемых экспериментах.

Программа CFAST прогнозирует температуру и высоту слоя горячих газов в пределах экспериментальной

погрешности в большинстве мест, где проводились измерения в трёх рассматриваемых испытаниях. Отклонения в некоторых местах расположения относятся скорее к ошибкам эксперимента, а не модели. В особенности, вычисления температуры и высоты слоя горячих газов довольно чувствительны к профилю измеряемой температуры, который в этих испытаниях определялся с помощью неизолированных термопар, которые могут иметь достаточно высокую погрешность. Большое расстояние между термопарами также приводит к увеличению погрешности в высоте слоя горячих газов. Результаты представлены ниже.

## **6.2 Выводы**

Далее представлены выводы относительно точности прогнозов по слою горячих газов. Двухзонное допущение, заложенное в программе CFAST, представляющее собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих сохранение массы и энергии потоков в стенде из нескольких комнат, как правило, обеспечивает адекватный прогноз температуры и высоты слоя газов.

- Прогнозы температуры и высоты слоя горячих газов, выполненные в программе CFAST, находятся (за некоторым исключением) в пределах экспериментальной погрешности или близки к ней. Прогнозы CFAST типичны среди прогнозов, встречающихся в других исследованиях, где температура слоя горячих газов слегка завышена, а высота слоя горячих газов слегка занижена (глубина слоя горячих газов чуть больше) по сравнению с экспериментальными измерениями. Эта разница, по всей вероятности, объясняется упрощениями, связанными со смешиванием слоёв, вовлечением воздуха в струю от огня и потоками через вентиляционные отверстия. Тем не менее, прогнозы в основном находятся в пределах 10% - 20% от экспериментальных измерений.
- Расчёт температуры и высоты слоя горячих газов имеет бóльшую погрешность в комнатах удалённых от пожара по сравнению с горящим помещением. Однако этот вывод основан на результатах всего одной серии испытаний.

## **7. ВЫСОТА ПЛАМЕНИ, ТЕМПЕРАТУРА ВОСХОДЯЩЕЙ И ПРИПОТОЛОЧНОЙ СТРУЙ**

### **7.1 Высота пламени**

Высота пламени определяется посредством визуальных наблюдений, фото- или видеосъёмки. Доступны видео материалы по серии испытаний NIST/NRC и фотографии по серии испытаний VTT в большом зале. Точное измерение высоты пламени представляет некоторую сложность, но фото- и видеоматериалы позволяют провести оценку с точностью до диаметра поддона.

#### **Серия испытаний VTT в большом зале**

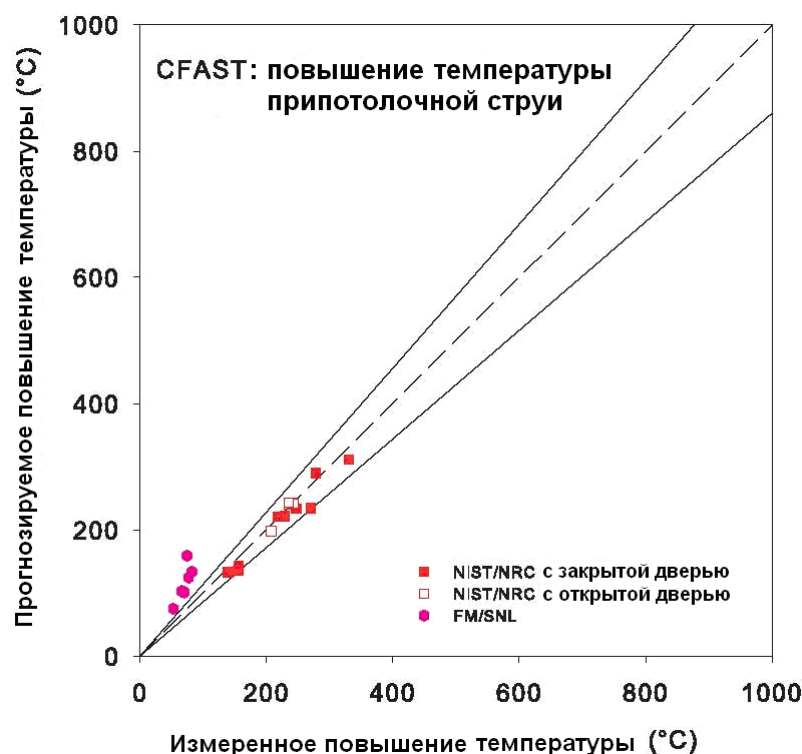
Высота видимого пламени на фотографиях оценивается в пределах от 2,4 до 3 диаметров поддона (3,8 – 4,8 м). По расчётам в программе CFAST высота пламени составляет 4,3 м.

#### **Серия испытаний NIST/NRC**

Программа CFAST оценивает максимальную высоту пламени в 2,8 м, что ориентировочно согласуется с видом через дверной проём в ходе испытания. Данная серия испытаний не была направлена на фиксирование высоты пламени.

### **7.2 Температура дымовой струи**

В программу CFAST входит алгоритм вовлечения воздуха в восходящую дымовую струю, основанный на работе МакКэффри (McCaffrey), моделирующий перемещение продуктов горения от огня вместе с воздухом и движение этих газов в верхний слой помещения. Температура струи не рассчитывается напрямую и не представлена в отчёте. Следовательно, сравнение экспериментально измеренных температур струи с расчётами в программе CFAST невозможно и в данный отчёт включено не будет.



**Рис. 7.1 Сравнение прогнозируемых и измеренных значений температуры припотолочной струи**

### 7.3 Припотолочные струи

Программа CFAST включает в себя алгоритм, учитывающий наличие более высоких температур газов у потолка в горящих помещениях. В модели эта повышенная температура приводит к увеличению конвективной теплопередачи поверхности потолка. Значения температуры и скорости припотолочной струи можно получить из модели путём установки датчика нагрева в заданном месте. Алгоритм припотолочной струи основан на модели, разработанной Купером [74], подробная информация приведена в руководстве «CFAST Technical Reference Guide» [2]. Алгоритм прогнозирует температуру газа и скорость под плоским, не имеющим преград потолком над источником возгорания. Только в двух сериях испытаний из шести (NIST/NRC и FM/SNL) были относительно большие плоские потолки.

На рис.7.1 представлено сравнение прогнозируемых и измеренных значений температуры припотолочной струи. В Приложении А приведены отдельные графики значений модели и экспериментальных значений. Ниже приведены выводы по оценке точности прогнозов для припотолочной струи в двух сериях испытаний:

#### Серия испытаний NIST/NRC

Температура на ближайшей к потолку термопаре в дереве 7 в задней части помещения была принята за температуру припотолочной струи. Программа CFAST прогнозирует температуру припотолочной струи в пределах экспериментальной погрешности для всех испытаний данной серии со средней относительной разностью 5%. В этих испытаниях источник возгорания был достаточно большим (относительно размеров комнаты), и припотолочная струя чётко определялась при измерениях температуры под потолком.

#### Серия испытаний лабораторий FM/SNL

Размер источника горения был сравним с минимальными размерами, использованными в серии испытаний NIST/NRC, а объём помещения значительно больше, и увеличение температуры под потолком в испытаниях лабораторий FM/SNL составило менее 100 °C во всех трёх испытаниях. Температуры слоя горячих газов для этих испытаний были ниже 70°C. Программа CFAST последовательно прогнозирует более высокие температуры припотолочной струи в испытаниях лабораторий FM/SNL по сравнению с экспериментальными. При большем размере комнаты по сравнению с масштабом пожара припотолочная струя в испытаниях лабораторий FM/SNL не настолько хорошо сформирована как в испытаниях NIST/NRC. Разность между температурой припотолочной струи и температурой слоя горячих газов в испытаниях лабораторий FM/SNL вдвое меньше наблюдаемой в испытаниях NIST/NRC. Прогнозирование завышенного значения температуры припотолочной струи обычно считается прогнозированием с запасом, но для сценариев, включающих в себя активацию спринклеров или тепловых датчиков, повышенная температура припотолочной струи приведёт к уменьшению времени их активации.

## 7.4 Выводы

Основываясь на физике модели и сравнении прогнозов модели с экспериментальными измерениями, можно сделать вывод, что программа CFAST производит адекватные расчёты температуры припотолочной струи в следующих случаях:

- В испытаниях с чётко определённым слоем программа CFAST прогнозирует температуру припотолочной струи в пределах экспериментальной погрешности.
- В испытаниях с менее чётко определённым слоем программа CFAST даёт завышенное значение температуры припотолочной струи. В ходе изучения испытаний завышенный прогноз наблюдался в случаях, когда температура слоя горячих газов была ниже 70°C.

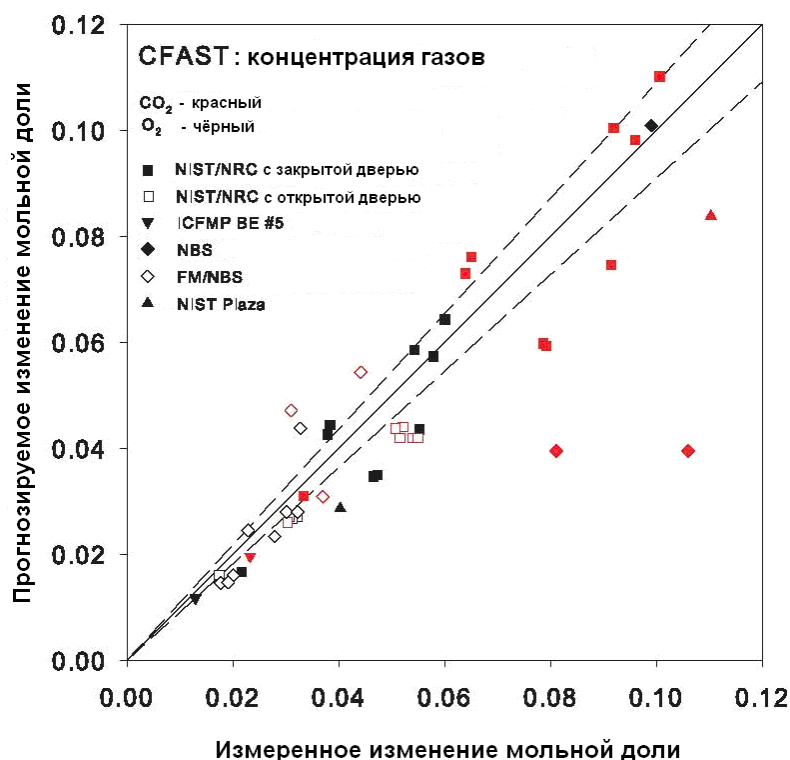
## 8. ВИДЫ ГАЗОВ И ДЫМ

Программа CFAST моделирует огонь как топливо с заданной скоростью пиролиза с выделением энергии и продуктов горения. CFAST рассчитывает выделение веществ, основываясь на задаваемых пользователем выходных параметрах; кроме того, скорость пиролиза и выделение энергии и продуктов горения ограничивается наличием кислорода. Если кислорода достаточно, скорость выделения тепла такая же, как и при пожаре в естественных условиях. Масса и состав продуктов горения отслеживаются моделью как поток газов через проёмы в другие помещения или наружу.

### 8.1 Серия испытаний NIST/NRC: кислород и CO<sub>2</sub>

Данные по газам взяты из серии испытаний NIST/NRC и BE 5 (одно испытание). На рис.8.1 представлено сравнение прогнозируемых и измеренных значений концентрации кислорода и углекислого газа, а также выводы об относительной разности в испытаниях.

Программа CFAST прогнозирует содержание кислорода и углекислого газа в верхнем слое близко к экспериментальной погрешности. В испытаниях 4 и 10 с закрытой дверью и испытаниях 9 и 14 с открытой дверью относительная разность выше, прогноз занижен на 22-25%. В испытаниях 4, 10 и 16 дверь была закрыта, и включена механическая вентиляция. Более высокие значения относительной разности в этих испытаниях вероятны из-за неоднородности слоя газа: повышенное содержание кислорода возле входного отверстия механической вентиляции и пониженное - вдали от него. В программе CFAST заложено допущение, что поток от системы механической вентиляции полностью смешивается с газами в соответствующем слое газа в помещении. Программа CFAST даёт заниженный прогноз снижения содержания кислорода, и испытания 9 и 14 показывают большую относительную погрешность по сравнению с другими испытаниями при закрытой двери. Причина повышения разности неясна.



**Рис. 8.1 Сравнение прогнозируемых и измеренных значений концентрации кислорода и углекислого газа**

## 8.2 Серия испытаний NIST/NRC: дым

Программа CFAST обращается с дымом как со всеми остальными продуктами сгорания, при этом общий баланс массы зависит от заданных пользователем значений выделения веществ при горении. Для моделирования движения дыма пользователь задаёт выделение дыма относительно выделенного угарного газа. Простая химическая реакция горения, заложенная в модели, определяет концентрацию макрочастиц дыма в форме оптической плотности. На рис.8.2 отражено сравнение прогнозируемых и измеренных значений концентрации дыма вместе с выводами об относительной разности в испытаниях.

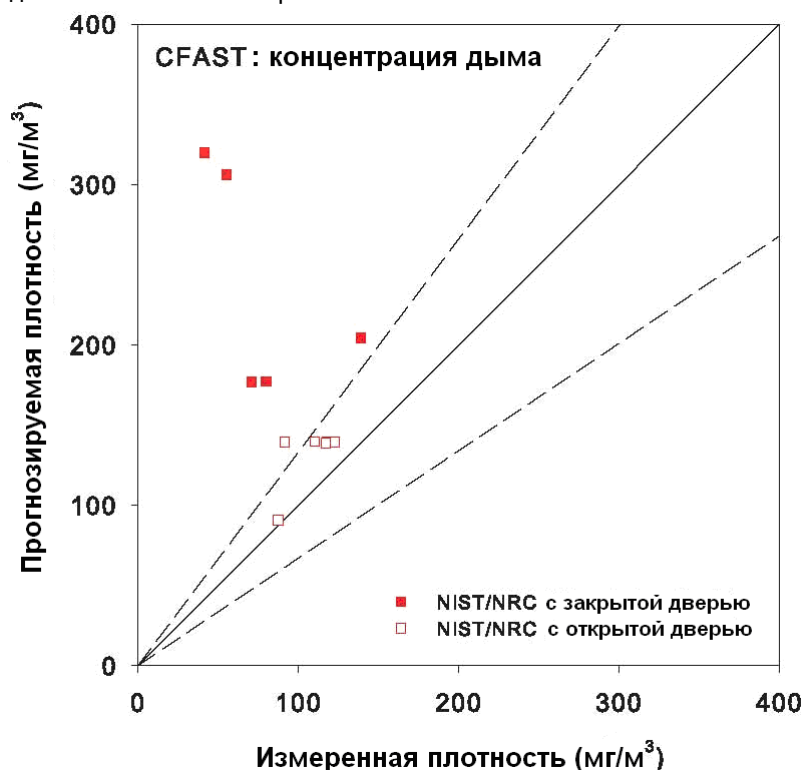


Рис. 8.2 Сравнение прогнозируемых и измеренных значений концентрации дыма

Для оценки прогнозов концентрации дыма использовалась только серия испытаний NIST/NRC. В этих испытаниях выделение дыма было задано как один из параметров испытания. В результатах наблюдаются две явные тенденции. Во-первых, в испытаниях с открытой дверью прогнозируемые значения концентрации находятся в пределах экспериментальных погрешностей или близки к ним. Во-вторых, в испытаниях с закрытой дверью прогнозируемые значения концентрации примерно в 3-5 раз выше измеренных значений. Установлено, что экспериментальная погрешность для этих измерений составляет 33%. Испытания с закрытой дверью нельзя истолковать на основе экспериментальной погрешности.

Разница между моделью и экспериментальным исследованием ещё более значительна в испытаниях с закрытой дверью. Учитывая, что в испытаниях с закрытой дверью прогнозы по кислороду и углекислому газу не хуже (а даже лучше), можно предположить, что дым либо не перемещается вместе с другими отходящими газами, либо значение выделения дыма, полученное из экспериментов со свободно горящими объектами, не подходит для испытаний с закрытой дверью. Эти качественные различия между испытаниями с открытой и закрытой дверями согласуются с прогнозами программы FDS (см. источник [75]).

## 8.3 Выводы

Основываясь на физике модели и сравнениях прогнозов модели с экспериментальными измерениями, расчёты содержания кислорода и углекислого газа, выполненные в программе CFAST, признаны подходящими для следующих случаев:

- В программе CFAST используется простая химическая реакция горения с установками пользователя, основанная на прогнозируемой скорости пиролиза и выделении продуктов горения.
- Программа CFAST даёт прогноз по основным видам газов близко к экспериментальной погрешности.

Расчёты по дыму, выполненные программой CFAST, следует применять с осторожностью по следующим причинам:

- В программе CFAST дым распространяется по всему помещению при условии, что известно его количество, и его свойства перемещения аналогичны свойствам газообразных продуктов сгорания.
- Как правило, программа CFAST даёт завышенный прогноз концентрации дыма во всех испытаниях NIST/NRC, за исключением испытания 17. Прогнозируемые значения для испытаний с откры-



той дверью находятся в пределах экспериментальных погрешностей, а для испытаний с закрытой дверью значительно превосходят их. На основе только этой серии данных невозможно сделать чётких заключений. Измерения в испытаниях с закрытой дверью либо противоречат закону сохранения массы либо, когда огню не хватает кислорода, в процессе горения происходят фундаментальные изменения.

## 9. ДАВЛЕНИЕ

Сравнения между измерением и прогнозированием давления в серии испытаний NIST/NRC отражены в Приложении А. На рис. 9.1 приведено сравнение прогнозируемых и измеренных значений давления в помещении, а также выводы об относительной разности.

В испытаниях, где дверь помещения открыта, избыточное давление составляет всего несколько паскалей; однако, когда дверь закрыта, избыточное давление может достигать сотен паскалей. Программа CFAST прогнозирует давление в пределах экспериментальной погрешности для испытаний как с закрытой, так и с открытой дверью. Исключением являлось испытание 16, в котором был большой пожар (2,3 МВт) с закрытой дверью и включенной вентиляцией. В отличие от этого испытания, в испытании 10 был пожар мощностью 1,2 МВт с аналогичной геометрией и вентиляцией. В испытании 16 наблюдается значительная погрешность в значениях массовых скоростей потоков приточной и вытяжной вентиляции. В испытании 10 измеренная скорость притока выше, а скорость вытяжки ниже, чем в испытании 16. Вероятно, это связано с более высоким давлением, создаваемым пожаром большей мощности в испытании 16. В программе CFAST скорость вентиляции не зависит от давления в помещении до тех пор, пока не будет достигнуто заданное значение давления отсечки. По всей вероятности, этим также объясняется прогнозирование более высокого давления в испытании 16.

В целом, прогнозирование давления в программе CFAST в закрытых помещениях во многом зависит от того, насколько точно задана утечка из помещения. Помещения редко бывают абсолютно герметичными, и небольшие изменения в площади утечки могут привести к значительным изменениям в прогнозе избыточного давления.

Основываясь на физике модели и сравнениях прогнозов модели с экспериментальными измерениями, можно сделать вывод, что расчёты давления в программе CFAST подходят для рассмотренных испытаний с учётом следующего:

- Программа CFAST прогнозирует значения давления в помещении в пределах экспериментальной погрешности во всех испытаниях за исключением одного.
- Прогнозирование давления в помещении с закрытой дверью во многом зависит от того, насколько точно задана утечка из помещения.

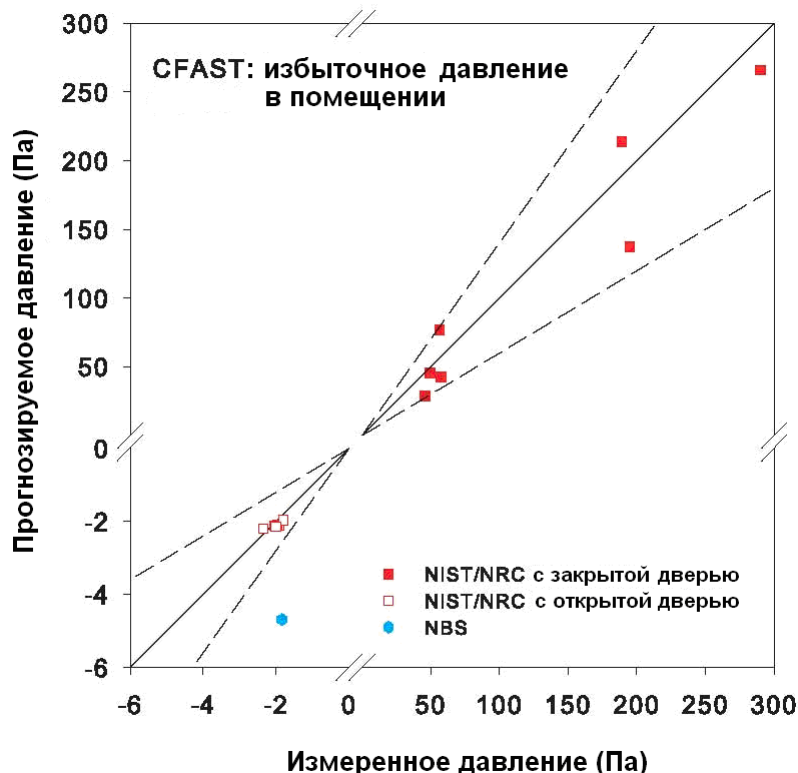


Рис. 9.1 Сравнение прогнозируемых и измеренных значений давления в помещении



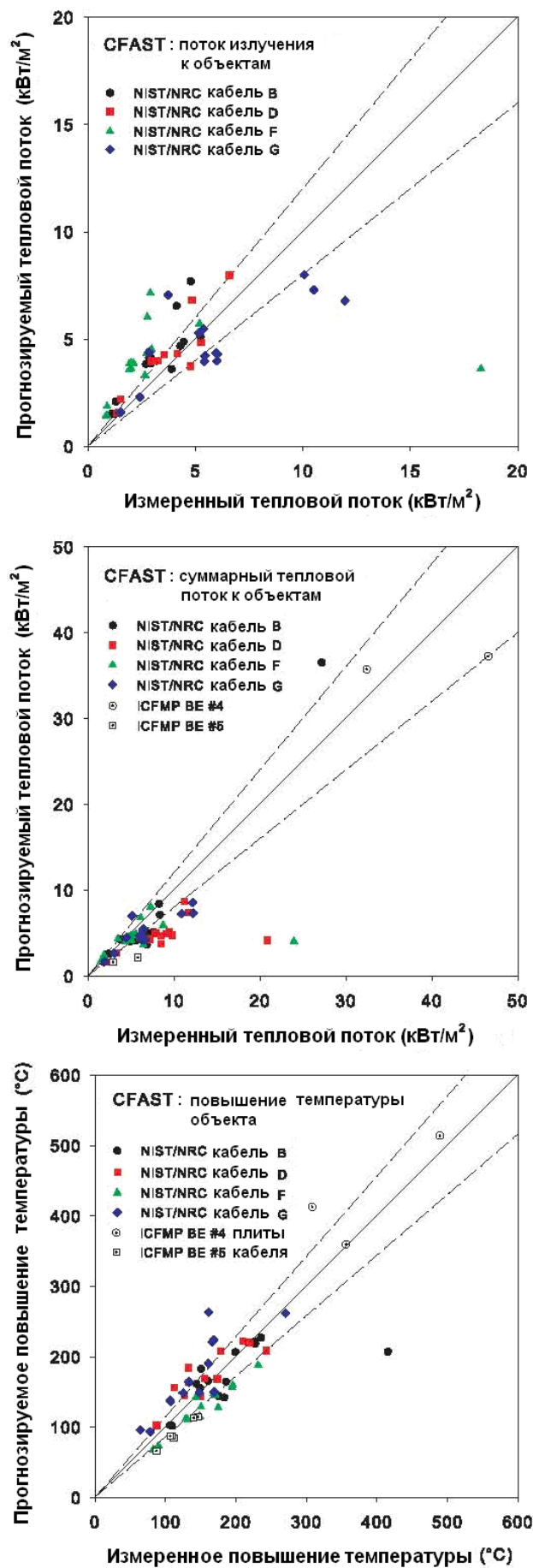
## 10. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ

### 10.1 Серия испытаний NIST/NRC: кабели

Данные о температуре объектов и тепловом потоке получены из серии испытаний NIST/NRC. Объектом испытаний NIST/NRC были различные типы кабелей в разных конфигурациях: горизонтальные, вертикальные, в лотках или свободно подвешенные. На рис.10.1 приведено сравнение прогнозируемых и измеренных значений теплового излучения, суммарного теплового потока и температуры объектов, а также выводы об относительной разности в испытаниях.

В Приложении А приведено около 200 сравнений теплового потока и температуры поверхности по четырём разным кабелям. Обобщающие выводы о точности программы CFAST сделать сложно. В лучшем случае можно изучить рисунки и связанные с ними таблицы, чтобы получить представление об её функционировании в целом, включая следующие тенденции:

- Разница между прогнозируемыми и измеренными температурами поверхности кабелей часто находится в пределах экспериментальной погрешности; исключения чаще всего наблюдаются в значениях для кабеля G. Точный прогноз температуры поверхности кабеля должен указывать на то, что тепловой поток к объекту (сочетание теплового излучения от огня, окружающих поверхностей и слоёв газа и конвекции газа) должен также быть точным. Для испытаний NIST/NRC прогнозы по поверхности кабелей показывают меньшую относительную разность по сравнению с суммарным тепловым потоком и (в особенности) потоком теплового излучения.
- Прогноз по суммарному тепловому потоку к объектам, как правило, находится в пределах средней разницы в 28% и часто является заниженным. Заметным исключением с большими погрешностями являются прогнозы для кабелей D и G.
- Прогноз по потоку теплового излучения к объектам, как правило, является завышенным по сравнению с экспериментальными измерениями и даёт более высокие значения для испытаний с закрытой дверью. Это может быть связано с завышенным прогнозом концентрации дыма, что приводит к увеличению вклада излучения от слоя горячих газов в суммарный тепловой поток по сравнению с экспериментом.
- Для большинства экспериментов конвективная доля теплового потока (разница между суммарным тепловым потоком и потоком теплового излучения) выше, чем значения, обычно получаемые в процессе измерений при пожарных испытаниях.



**Рис. 10.1 Сравнения прогнозируемых и измеренных значений теплового потока к объектам и температуры объектов**

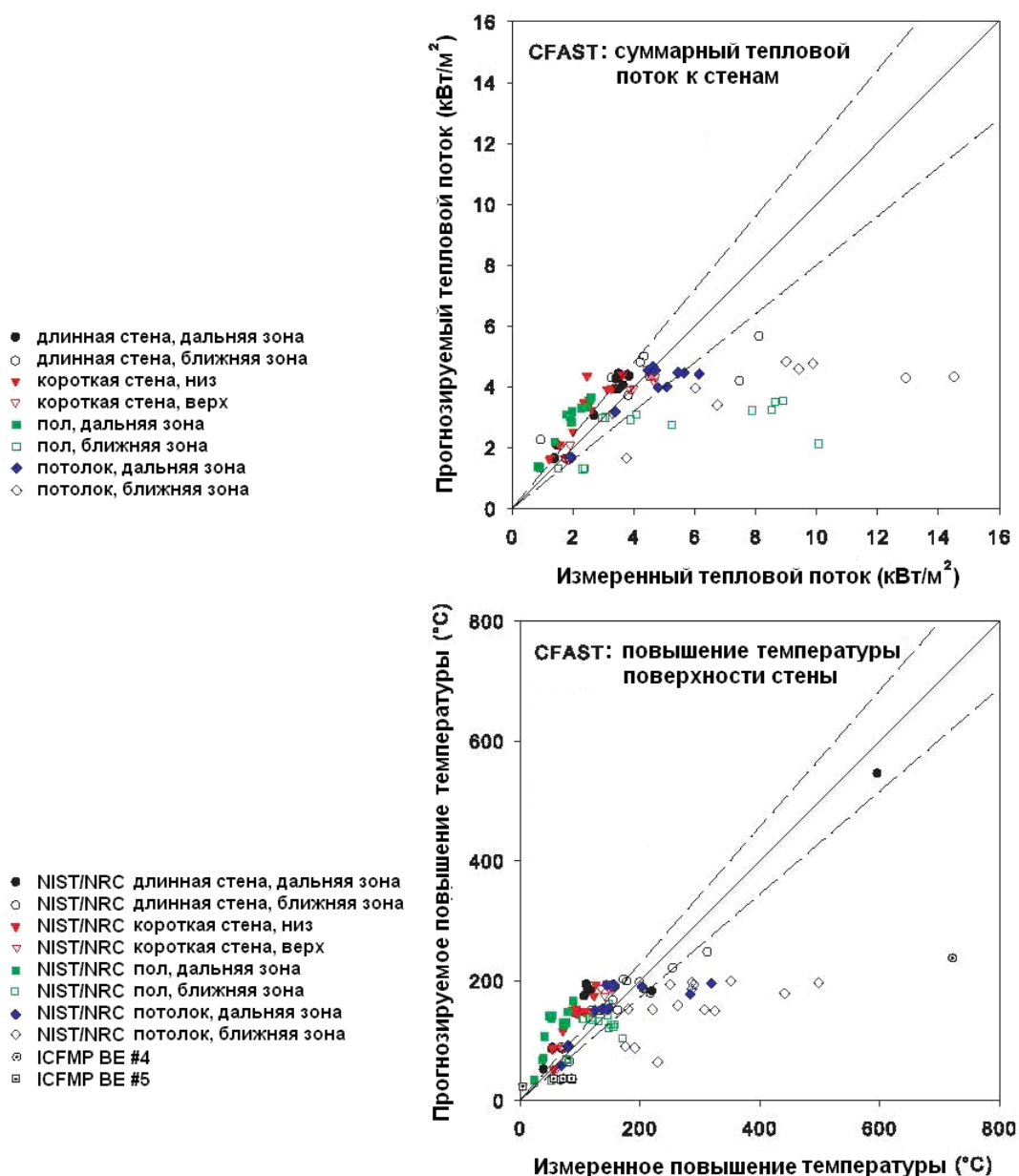
## 10.2 Серия испытаний NIST/NRC: стены, пол и потолок помещения

Тридцать шесть приборов, измеряющих тепловой поток, были установлены в разных местах на стенах помещения, а также на полу и потолке. Сравнения измеренных и прогнозируемых значений тепловых потоков и температур поверхности для выбранных мест расположения датчиков приведены на следующих страницах. Положение более половины точек измерения относительно огня примерно одинаковое, следовательно, измерения и прогнозы сходны. По этой причине представлены данные по восточной и северной стенам, поскольку данные по южной и западной стенам схожи с ними. Данные по южной стене применяются, когда произошёл сбой соответствующего прибора на северной стене, или когда огонь находится рядом с южной стеной. Для сравнения по каждому испытанию используется восемь мест расположения датчиков: два - на длинной (преимущественно северной) стене, два - на короткой (восточной) стене, два - на полу и два - на потолке. Считается, что одно из двух мест расположения датчиков на каждой из поверхностей находится в дальней зоне (относительно далеко от огня); а другой - в ближней зоне (относительно близко к огню). Насколько близко или далеко, варьируется от испытания к испытанию в зависимости от наличия работающих измерителей потока. Два места расположения на коротких стенах в равной степени удалены от огня; в связи с этим, одно место расположения находится в нижнем слое, а другое - в верхнем.

На рис.10.2 представлено сравнение прогнозируемых и измеренных значений теплового излучения, суммарного теплового потока и температуры объектов наряду с выводами об относительной разности в испытаниях.

Программа CFAST обычно прогнозирует тепловой поток и температуру поверхности стен помещения в пределах 10-30%. Как правило, программа CFAST даёт завышенный прогноз для потоков и температур в дальней зоне и заниженный прогноз в ближней. Это понятно, учитывая, что любая двухзоновая модель прогнозирует среднее характерное значение температуры газа в верхней и нижней частях помещения. Таким образом, значения, прогнозируемые программой CFAST должны быть усреднённым значением тех, что находятся в ближней зоне, и тех, что находятся в дальней.

Однако, различия для потоков у потолка и (в особенности) пола и различия температур выше; при этом более значительная разница наблюдается при сравнении ближней и дальней зон. Помимо ограничений двухзонового допущения, расчёты потока к поверхностям пола и потолка в программе CFAST ещё более затруднены из-за расчёта обмена излучением на основе точечного источника. В программе CFAST огонь рассматривается как точечный источник энергии, а не как трёхмерная поверхность пламени, выделяющая излучение в окружающую среду. Огонь находится, как правило, на полу, и это приводит к тому, что расчёт потока для поверхности пола менее точен, чем для других поверхностей.



**Рис. 10.2 Сравнения прогнозируемых и измеренных значений теплового потока к поверхностям помещения и температуры поверхности**

### 10.3 Выводы

Программу CFAST для расчётов теплового потока и температуры следует применять с осторожностью по следующим причинам:

- Прогнозирование значений теплового потока к объектам и температуры поверхности объектов во многом зависит от локальных условий. Как любая двухзоновая модель, программа CFAST прогнозирует среднее характерное значение температуры газа в верхней и нижней частях помещения. Помимо этого программа CFAST не прогнозирует напрямую температуру восходящей дымовой струи или её влияние на объекты, которые могут оказаться в зоне струи. Таким образом, программа CFAST может дать заниженные значения рядом с источником возгорания и завышенные значения для объектов вдали от огня.
- Прогнозы температуры поверхности объектов часто находятся в пределах экспериментальной погрешности; исключения составляют кабели F и G.
- Суммарный тепловой поток к объектам, как правило, прогнозируется в пределах 30%, и часто прогноз является заниженным.
- Прогноз по потоку теплового излучения к объектам, как правило, завышен по сравнению с экспериментальными измерениями; при этом значения относительной разности выше для испытаний с закрытыми дверями.
- Программа CFAST может прогнозировать температуру поверхности стены при условии, что её структура достаточно однородна, а тепловые свойства чётко определены. Прогнозы, как прави-

ло, в пределах 10-30%. Обычно программа CFAST даёт завышенный прогноз для потоков и температур в дальней зоне и заниженный прогноз в ближней зоне. Это согласуется с единой характеристической температурой слоя, рассматриваемой зональными моделями пожара.

- Прогнозы программы CFAST по тепловому потоку и температуре в районе пола особенно проблематичны из-за расчёта обмена излучением между огнём и поверхностями помещения на основе точечного источника.

## 11. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос, каким образом лучше измерять различия между прогнозами модели и экспериментами, не слишком тривиален. Необходимая степень соответствия любой переменной зависит и от обычного применения данной переменной в расчёте (например, пользователя может интересовать время достижения определённой температуры в помещении), и от сути эксперимента (пиковые температуры мало интересны в эксперименте, где быстро достигается установившийся режим), и от контекста сравнения (надлежащая проверка достоверности модели включает в себя правильную статистическую обработку многих сравниваемых переменных).

Недостаток экспериментальных данных и слабое понимание того, как сравнивать многочисленные переменные в сложной модели пожара затрудняют выполнение проверки достоверности. Таким образом, обсуждаемая здесь разница прогнозов модели и экспериментальных данных намеренно упрощена и варьируется от испытания к испытанию и от переменной к переменной в зависимости от сути испытания и использования переменной.

На основании изучения четырёх параметров сделан вывод, что физика модели в точности отражает условия экспериментов, а вычисленные относительные разности между прогнозами модели и экспериментальными значениями хорошо согласуются с суммарной погрешностью эксперимента и входных данных. Ниже приведены некоторые комментарии относительно сравнений:

- Прогнозы по высоте и температуре слоя горячих газов, выполненные в программе CFAST, за некоторым исключением, находятся в пределах экспериментальной погрешности либо приближены к ней. Прогнозы CFAST типичны для прогнозов, встречающихся в других исследованиях: температура слоя горячих газов обычно слегка завышена, а высота слоя слегка занижена (глубина слоя чуть больше) по сравнению с экспериментальными измерениями. Тем не менее, прогнозы в основном в пределах 10 - 20% от экспериментальных измерений. Расчёт температуры и высоты слоя горячих газов даёт большую погрешность в помещениях, удалённых от огня (по сравнению с горящим помещением).
- Согласно большинству сравнений программа CFAST прогнозирует температуру припотолочной струи в пределах экспериментальной погрешности. В случаях, когда температура слоя горячих газов была ниже 70°C, наблюдалось значительное завышение прогнозируемых значений.
- Прогнозы по высоте пламени, выполненные в программе CFAST, согласуются с визуальными наблюдениями высоты пламени в ходе экспериментов. Это не удивительно, учитывая, что для расчёта высоты пламени программа CFAST использует чётко определённую экспериментальную зависимость.
- Прогнозы CFAST относительно концентрации газа и давления в помещении находятся в пределах экспериментальной погрешности или близки к ней.

Выяснилось, что при использовании модели для оценки трёх параметров требуется осторожность. Обычно это указывает на ограничения в использовании модели. Ниже приведены некоторые пояснения:

- Программа CFAST, как правило, даёт завышенный прогноз концентрации дыма. Прогнозируемые значения концентрации для испытаний с открытой дверью находятся в пределах экспериментальных погрешностей, а для испытаний с закрытой дверью – значительно превышают их.
- За некоторым исключением программа CFAST прогнозирует температуры поверхности кабелей в пределах экспериментальных погрешностей. Суммарный тепловой поток к объектам обычно прогнозируется в пределах примерно 30%, и зачастую прогноз бывает заниженным. Прогноз по тепловому излучению к объектам обычно завышен по сравнению с экспериментальными измерениями, при чём значения относительной разности выше для испытаний с закрытой дверью. Следует соблюдать осторожность при прогнозировании локальных условий (таких как температура объектов и тепловой поток) из-за ограничений присущих всем зональным моделям пожара.
- Прогнозы по температуре поверхностей и тепловому потоку в помещении, как правило, находятся в пределах 10 - 30%. В целом, программа CFAST даёт завышенный прогноз для потоков и температур в дальней зоне и заниженный прогноз в ближней зоне. Это согласуется с единой характеристической температурой слоя в зональных моделях пожара. Температура струи не рассчитывается напрямую и не выводится в отчёт CFAST. Ей не присвоена цветовая градация. Если параметру не присвоена цветовая градация, модель не включает выходные данные для его оценки.

Прогнозы CFAST в данном исследовании по проверке достоверности согласуются с многочисленными исследованиями, проводимыми ранее, что свидетельствует о том, что применение модели уместно для широкого спектра сценариев пожара. Модель CFAST подверглась подробным оценочным исследованиям, проводимым специалистами Национального института стандартов и технологий США (NIST) и других организаций. Хотя в

ходе этих исследований были обнаружены различия между моделью и испытаниями, большинство различий может быть объяснено ограничениями, присущими как модели, так и экспериментам. Как и в случаях со всеми прогнозирующими моделями, наилучшие прогнозы можно сделать при ясном понимании ограничений модели и входных данных, предоставленных для осуществления расчётов.