Содержание

1. Введение **2**
1.1. Информация о переводе 2
1.2. Переведенные главы 2
1.3. Список сокращений 3
1.4. Список литературы. FDS 4

2. Глава 1 **4**
2.1. Валидация модели 4
2.2. Слепой, заданный и открытый методы оценки экспериментов 5

3. Глава 2 **7**
3.1. Обзор проведенных работ по валидации 7
3.2. Валидация FDS с 2000 года 8

4. Глава 3 **9**
4.1. ATF эксперименты в коридорах 9
4.2. NBS/НБС многокомнатные эксперименты 10
4.3. Исследование вентиляционных отверстий NIST 12
4.4. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST 15

5. Глава 5 **17**
5.1. Температура и глубина HGL 17
5.2. Метод приведения HGL 17
5.3. Коридоры в экспериментах ATF 18
5.4. NBS/НБС серия многокомнатных экспериментов 22
5.5. Исследование вентиляционных отверстий NIST 25
5.6. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST 31

6. Глава 7 **32**
6.1. ATF эксперименты в коридорах 32
6.2. Исследование вентиляционных отверстий NIST 38
6.3. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST 40
6.4. ATF Эксперименты в коридорах 41

---

title: FDS

subtitle: Техническое руководство FDS. Валидация.

date: версия 6.8

author: АО «Современные программные технологии»

annotation: Данный документ представляет собой перевод отдельных разделов техническог

titlepage: true

titlepage-text-color: “000000”

titlepage-rule-height: 0

titlepage-background: “background.pdf”

1. Введение

1.1. Информация о переводе

Данный документ представляет собой перевод отдельных разделов технического руководства *«Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation»*. Документ не является официальной версией этого руководства на русском языке. К программе FDS.

> *Версия исходного документа для перевода:* FDS6.7.1

На данный момент работа по переводу разделов технического руководства не закончена. Документ находится в разработке и будет обновляться по мере перевода новых глав и разделов.

1.2. Переведенные главы

Особенностью документа *«Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation»* является то, что сначала описывается эксперимент, затем в нескольких разделах происходит сравнение результатов эксперимента и результатов моделирования.

Стоит отметить, что в одном разделе происходит сравнение по какому-то одному параметру. То есть, информация по одному эксперименту, разнесена в разные разделы документа.

Переведенные главы документа:

- What is Model Validation? (1)
- Blind, Specified, and Open Validation Experiments (1.1)
- Survey of Past Validation Work (2)
- Validation of FDS since 2000 (2.2)
- ATF Corridors Experiments (3.3) и ATF Corridors (5.2) и ATF Corridors Experiment (7.1.1) и ATF Corridor Experiments (8.1)
- NBS Multi-Room Experiments (3.28) и NBS Multi-Room Test Series (5.7)

Эксперименты с вентилируемыми помещениями:

- HGL Temperature and Depth.(5) и HGL Reduction Method (5.1)
- NIST Vent Study (3.58) и NIST Vent Study (5.13) и NIST Vent Study (7.1.10)
- UL/NIST Vent Experiments (3.79) и UL/NIST Vent Experiments (5.19) и UL/NIST Vent Experiments (7.1.17)

1.3. Список сокращений

- ALOFT — A Large Outdoor Fire plume Trajectory model;
- AST — Adiabatic Surface Temperature;
- ASTM — American Society for Testing and Materials;
- ATF — Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms, and Explosives;
- BRE — British Research Establishment;
- CAROLFIRE — Cable Response to Live Fire Test Program;
- CFAST — Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport;
- CHRISTIFIRE — Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Fire Test Program;
- CFT — Critical Flame Temperature;
- DNS — Direct Numerical Simulation;
- FAA — Federal Aviation Administration;
- FDS — Fire Dynamics Simulator;
- FLAME — Fire Laboratory for Accreditation of Models by Experimentation;
- FM — Factory Mutual Global;
- FSE — Full-Scale Enclosure;
- HAI — Hughes Associates, Inc.;
- HDPE — high density polyethylene;
- HGL — Hot Gas Layer;
- HIPS — high-impact polystyrene;
- HRR — Heat Release Rate;
- ISO — International Standards Organization;
- LEMTA — Laboratoire d’Energétique et de Méchanique Théorique et Appliquée;
- LES — Large Eddy Simulation;
- LLNL — Lawrence Livermore National Laboratory;
- LNG — Liquified Natural Gas;
- MEC — Minimum Extinguishing Concentration;
- NBS — National Bureau of Standards (former name of NIST);
- NFPRF — National Fire Protection Research Foundation;
- NIST — National Institute of Standards and Technology;
- NRC — Nuclear Regulatory Commission;
- NRCC — National Research Council of Canada;
- NRL — Naval Research Laboratory;
- PDPA — Phase Doppler Particle Analyzer;
- PIV — Particle Image Velocimetry;

- PMMA — poly(methyl methacrylate);
- PRISME — Propagation d'un incendie pour des scénarios multi-locaux élémentaires;
- PVC — Polyvinyl chloride.

1.4. Список литературы. FDS

Ниже представлен список литературы и прочих публикаций, которые упоминаются в тексте данного документа.

[2] ASTM E 1355 — Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models

[132] D.T. Sheppard and B.W. Klein. Burn Tests in Two Story Structure with Hallways. Technical report, ATF Laboratories, Ammendale, Maryland, 2009. 17

[198] R.D. — Peacock, S. Davis, and W.T. Lee. An Experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models. NBSIR 88-3752, National Bureau of Standards (now NIST), Gaithersburg, Maryland, April 1988. 46

[205] S.L. Manzello, S.H. Park, T. Mizukami, and D.P. Benz. Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures. In Proceedings of the Fifth International Conference on Structures in Fire (SiF'08), pages 656–665, Nanyang Technological University, Singapore, 2008. 63

[236] K.M. Opert. Assessment of Natural Vertical Ventilation for Smoke and Hot Gas Layer Control in a Residential Scale Structure. Master's thesis, University of Maryland, College Park, Maryland, 2012.78

[270] M.L. Janssens and H.C. Tran. Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation. Journal of Fire Science, 10:528–555, 1992. 121

2. Глава 1

2.1. Валидация модели

Несмотря на то, что существует множество различных определений валидации модели, например, в ASTM E 1355 **[2]**, чаще всего данный термин понимается как процесс определения того, насколько хорошо математическая модель предсказывает реальные физические явления.

Валидация обычно включает в себя следующие аспекты:

- Сравнение предсказаний модели с экспериментальными измерениями;

- Количественную оценку различий с учетом неопределенностей как в измерениях, так и в исходных данных модели;
- Принятие решения о том, подходит ли модель для указанной задачи.

В данном руководстве выполняются первые два аспекта. Последний аспект является ответственностью конечного пользователя.

Утверждение, что модель FDS (Fire Dynamic Simulator) «проверена», означает, что конечный пользователь оценил неопределенность модели для указанной задачи и решил, что данная модель является пригодной. Хотя разработчики FDS тратят значительное количество времени на сравнение прогнозов, полученных с использованием моделей, с экспериментальными данными, в конечном итоге именно конечный пользователь решает, подходит ли данная модель для конкретной задачи.

Данное руководство представляет собой просто набор результатов расчетов. По мере развития FDS оно будет расширяться и включать новые экспериментальные данные новых смоделированных физических явлений. С каждым последующим выпуском FDS (например, с версий 5.2 до 5.3) графики и иллюстрации обновляются, чтобы при изменении модели обеспечивалось сохранение точности данных, приведенных в предыдущей версии. В последующих разделах обсуждаются ключевые вопросы, которые необходимо учитывать при принятии решения о том, подходит ли FDS для данного приложения. Это зависит от:

- Рассматриваемых сценариев;
- Прогнозируемых величин;
- Желаемого уровня точности.

FDS может использоваться для моделирования любых пожаров и прогнозирования практически любых интересующих вас данных, но оно может быть неточным из-за ограничений в описании физики пожара, а также из-за ограниченной информации о горючих материалах, геометрии и т д.

2.2. Слепой, заданный и открытый методы оценки экспериментов

Стандарт ASTM E 1355 **[2]** описывает три основных типа проверочных расчетов – *слепой*, *заданный* и *открытый*.

Слепой расчет. Пользователю модели предоставляется основное описание сценария, который будет моделироваться. Для данного расчета описание не является точным, пользователь модели отвечает за разработку соответствующих входных данных модели, включая, при необходимости, дополнительные подробные сведения о геометрии, свойствах материала и описание пожара. Дополнительные сведения, необходимые для моделирования сценария с помощью конкрет-

ной модели остаются на усмотрение ее пользователя. Кроме иллюстрации совместимости моделей в реальных условиях эксплуатации данный метод дает возможность пользователям протестировать соответствующие входные данные для моделей.

Заданный расчет. Пользователю модели предоставляется полное и подробное описание входных данных модели, включая геометрию, свойства материала и описание пожара. В дополнение к слепому расчету данный тест обеспечивает более точное сравнение физических процессов, лежащих в основе моделей, при более полном заданном сценарии.

Открытый расчет. Пользователю модели предоставляется самая полная информация о сценарии, включая геометрию, свойства материалов, описание пожара и результаты экспериментальных или оценочных испытаний моделей, которые использовались в оценке слепых или заданных расчетов сценария.

Различия в доступных входных данных (используемых для слепого метода) становятся наиболее очевидными при сравнении открытого и слепого расчетов.

Расчеты, представленные в настоящем руководстве, относятся к категории открытых. Для этого существует несколько причин, и первая и наиболее практичная заключается в том, что:

- Все расчеты, представленные в настоящем руководстве, повторяются при каждом переиздании FDS (например, от издания 5.3 до 5.4). Тот факт, что эксперименты уже проводились, а результаты известны, характеризуют эти расчеты как открытые;
- Некоторые из расчетов, описанных в настоящем руководстве, подпадают в категорию заданных, поскольку они изначально осуществлялись до проведения эксперимента. Однако, практически в каждом случае, эксперимент не осуществлялся в точном соответствии с указанными требованиями, а предварительно рассчитанные результаты не оказались полезными при определении точности модели;
- В действительности ни один из расчетов не являлся слепым, даже те, которые проводились до экспериментов. Целью слепого расчета является оценка степени влияния выбора входных параметров на результат.

Однако, в таких случаях невозможно отличить недостоверность, связанную с выбором входных параметров от тех параметров, которые связаны с моделью. Основная цель настоящего руководства - количественное определение недостоверности самой модели, а в этом случае слепые расчеты бесполезны.

3. Глава 2

3.1. Обзор проведенных работ по валидации

В этой главе представлен обзор работ по валидации FDS . Часть работ была выполнена в NIST. Некоторые были выполнены получателями грантов, а некоторые инжиниринговыми фирмами, использующими данную модель. Поскольку у каждой организации свои собственные причины для проверки модели, упомянутые документы и отчеты не следуют принимать как конкретные рекомендации. Некоторые из работ дают только качественную оценку модели, считая, что соответствие модели конкретному эксперименту является «хорошим» или «разумным». Иногда вывод заключается в том, что модель работает хорошо в некоторых случаях и не работает в других. Эти исследования также включены в обзор, потому что такие ссылки полезны для других пользователей модели, которые могут иметь схожую сферу применения и быть заинтересованными даже в качественной оценке. Важно отметить, что некоторые документы указывают на недостатки в ранних выпусках FDS, которые были исправлены или улучшены в последующих выпусках. Однако, некоторые из поднятых вопросов по-прежнему являются предметом активных исследований. На планирование исследований FDS большое влияние оказывают отзывы пользователей, часто через публикации по усилиям в этом направлении.

Полезно разделить различные направления валидации, описанные в этой главе, на два класса: те, для которых скорость выделения тепла (HRR) при пожаре **указана** в качестве входных данных для модели, и те, для которых HRR **прогнозируется** *моделью*. Первый вариант часто используется для проектного приложения, последний - в судебных разбирательствах.

Проектные приложения обычно включают существующее или проектируемое здание. Так называемый «проектный пожар» определяется либо регулирующим органом, либо инженерами, проводящими анализ. Поскольку скорость тепловыделения при пожаре указана, то модель необходима для прогнозирования переноса тепла и продуктов сгорания по комнате или комнатам, представляющим интерес. В моделирование часто включается влияние вентиляционного оборудования, такого как вентиляторы, воздуходувки, вытяжные колпаки, воздуховоды ОВКВ, системы контроля задымления и т.д. Особый интерес представляет активация спринклеров, а также детекторов тепла и дыма. Влияние спринклеров на распространение огня, как правило, представляет меньший интерес, поскольку скорость тепловыделения при пожаре указывается, а не прогнозируется. Подробные описания содержимого здания обычно не нужны, поскольку предполагается, что эти предметы не способствуют пожару, и даже если они есть, скорость горения будет указана, а не прогнозируется. Иногда необходимо прогнозировать поток тепла от огня к находящейся поблизости «цели», и даже если цель может нагреться до

некоторой заданной температуры воспламенения, последующее распространение огня обычно выходит за рамки анализа из-за неопределенности параметров распространения огня от объекта к объекту.

Для криминалистических реконструкций требуется, чтобы модель имитировала фактический пожар на основе информации, собранной после события, такой как учетные записи свидетелей, несгоревшие материалы, сигнатуры ожогов и т.д. Цель моделирования - связать последовательность дискретных наблюдений с непрерывным описанием динамики огня. Обычно при реконструкциях требуется больше данных о взаимодействии газ / твердая фаза, потому что практически все объекты в данной комнате потенциально воспламеняются, особенно когда происходит вспышка. Таким образом, гораздо больше внимания уделяется таким явлениям, как передача тепла на поверхности, пиролиз, распространение пламени и его подавление. Как правило, криминалистическая реконструкция представляет собой более сложную симуляцию, поскольку требует более подробного описания процесса. Требуется информация о содержании комнаты, а также более значительная неопределенность в общей скорости тепловыделения при распространении огня от объекта к объекту.

Валидационные исследования FDS до настоящего времени были сосредоточены больше на проектных приложениях чем на реконструкциях. Причина в том, что проектные приложения обычно включают определенные пожары и требуют минимум информации о теплофизических свойств реальных материалов. Распространение дыма и тепла является основной задачей, и измерения могут быть ограничены хорошо расположенными термопарами, несколькими датчиками теплового потока, пробоотборниками газа и т.д. Явления, имеющие большое значение в судебно-медицинской экспертизе, такие как воспламенение второго элемента, распространение пламени, эффекты разрушения и др. угасание, которые труднее моделировать и труднее изучать с помощью надежно контролируемых экспериментов. Неопределенности в свойствах материалов и измерениях, а также упрощение допущений в модели часто приводит, в лучшем случае, к качественным сравнениям модели и реальными данными. Тем не менее, усилия по валидации в этом приносят свои плоды.

3.2. Валидация FDS с 2000 года

NIST и другие организации продолжают прилагать усилия по оценке FDS по мере включения новых инструментов. К настоящему времени большая часть данной работы концентрировалась на способности модели к прогнозированию передачи тепла и продуктов горения от огня на корпус. В данных исследованиях интенсивность тепловыделения обычно задается вместе со скоростью выделения различных продуктов сгорания. В последнее время усилия по валидации переключились с вопросов исключительно передачи тепла на вопросы учета роста и распростра-

нения пламени, тушения, срабатывания спринклерных головок и датчиков, а также других относящихся к пожару явлений.

Работу по валидации, рассматриваемую ниже, можно разделить на несколько категорий:

- Сравнения с испытаниями полноразмерной модели, проведенных для выбранной оценки;
- Сравнения с ранее опубликованными данными об испытаниях полноразмерных моделей;
- Сравнения со стандартными испытаниями;
- Сравнения с задокументированным опытом пожара;
- Сравнения с инженерными корреляциями.

Единый метод, посредством которого осуществляется сравнение расчетов и измерений, отсутствует. С формальной точки зрения тщательная валидация занимает много времени и является дорогостоящей. Большая часть валидаций проводится просто для оценки возможности использования модели под конкретную задачу. Хотя они и не являются исчерпывающими, данные исследования внесли неоценимый вклад в оценку модели.

4. Глава 3

4.1. ATF эксперименты в коридорах

Серия из восемнадцати экспериментов была проведена в двухэтажной структуре с длинными коридорами и соединяющей их лестницей, в большой камере сгорания Исследовательской Лаборатории Пожаров ATF в Аммендейле, штат Мэриленд, в 2008 году **[132]**. Модель для испытаний представляла собой два коридора длиной 17,0 м, соединенных между собой лестницей, состоящей из двух пролетов с промежуточной площадкой. В противоположном конце коридора на первом этаже была дверь, которая в ходе всех испытаний была закрыта. Конец коридора второго этажа был открыт софитом у потолка.

Стены и потолки испытуемой конструкции были изготовлены из гипсокартона толщиной 1,2 см. Пол во всей конструкции, включая лестничную площадку, состоял из одного слоя цементной плиты толщиной 1,3 см на одного слоя фанеры толщиной 1,9 см, поддерживаемого деревянными балками. Первый пролет лестницы, ведущей с первого этажа к площадке, имел восемь ступеней. Второй пролет имел девять ступеней ведущих от площадки до второго этажа. Лестница была изготовлена из чистой сосновой древесины толщиной 2,5 см. Два пролета лестницы были разделены промежутком шириной приблизительно 0,42 м в середине

лестницы. Этот промежуток был отделен от лестницы барьером высотой 0,91 м, построенным из одного куска гипсокартона. На первом этаже был открыт дымоход. Дымоход был отделен от второго этажа барьером из гипсокартона высотой 0,9 м. В конце первого этажа возле горелки была металлическая дверь наружного типа. В ходе всех экспериментов эта дверь была закрыта.

Источником огня была газодиффузионная горелка. Поверхность горелки была горизонтальной, квадратной, с промежутком 0,45 м с каждой стороны, 0,37 м над полом, горелка была загружена гравием. Горелка была расположена в конце первого этажа в стороне от лестницы. Схема испытываемой конструкции показана на рисунке ниже.

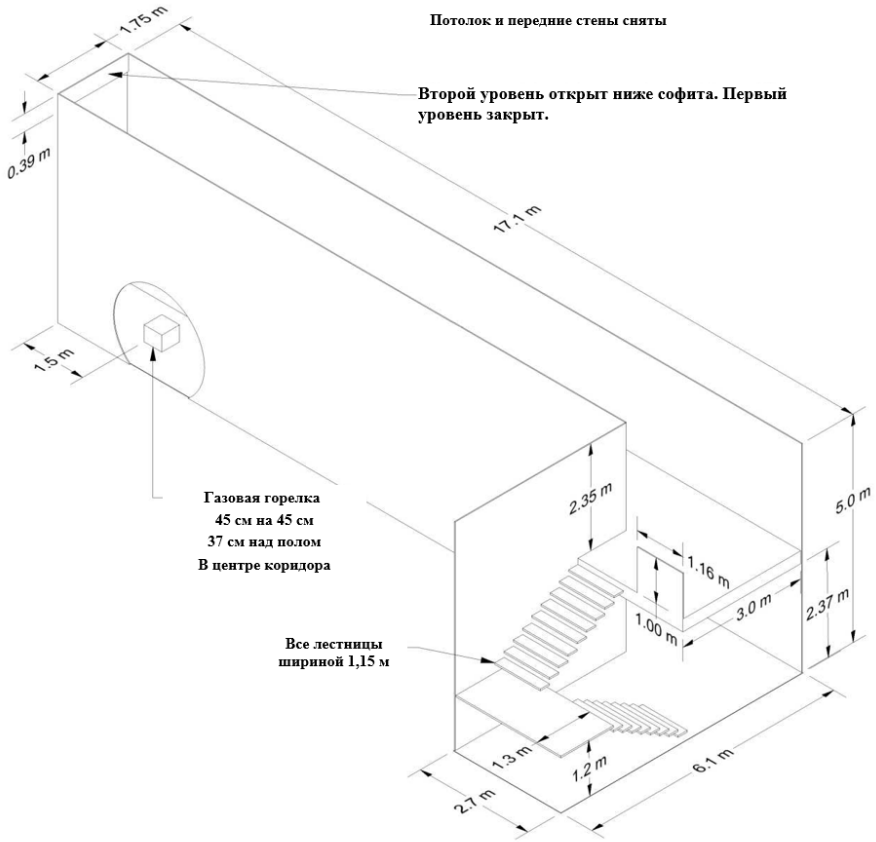

Рис. 1: Геометрия коридоров в испытаниях ATF

4.2. NBS/НБС многокомнатные эксперименты

Многокомнатные эксперименты, проводимые Национальным бюро стандартов NBS/НБС, а ныне Национальным Институтом Стандартов и Технологий, NIST/НИСТ, состояли из 45 испытаний на огнестойкость, в 9-ти различных наборов условий, которые проводились в трехкомнатных номерах (см. рис. ниже). Эксперименты проводились в 1985 году и подробно описаны в работе **[198]**. Номер состоял из двух относительно небольших комнат, соединенных относительно длинным коридором. Источник огня, газовая горелка, располагался

у задней стенки одного из небольших отсеков. Были проведены пожарные испытания мощностью 100 кВт, 300 кВт и 500 кВт. В данных исследованиях было проведено только три пожарных эксперимента мощностью 100 кВт, включая Испытание 100A из набора 1, Испытание 100O из набора 2 и Испытание 100Z из набора 4. Эти испытания были выбраны потому, что они использовались в предыдущих валидационных исследованиях, а так же потому что эти тесты имели самые устойчивые значения измеренной скорости тепловыделения в течение всего периода устойчивого горения.

Ниже приводится дополнительная информация, предоставленная директором по тестированию Ричардом Пикоком (Richard Peacock) из НИСТ (NIST):

Интенсивность тепловыделения (HRR/ИТ): В двух испытаниях, в которых дверь была открыта, HRR/ИТ в течение периода устойчивого горения, измеренного с помощью калориметрии по потреблению кислорода, составляла 110 кВт с погрешностью около 15%, что соответствует повторным измерениям, проведенным во время экспериментальной серии, и неопределенности, типичной для калориметрии по потреблению кислорода. Предполагалось, что испытание с закрытой дверью (Испытание 100O) имело тот же HRR/ИТ, что и испытание с открытой дверью.

Теплопередача Излучением: При испытании 100A в качестве топлива использовался природный газ. В испытаниях 100O и 100Z к природному газу добавляли ацетилен для увеличения выхода дыма, и, как следствие, увеличения доли излучения. Теплопередача Излучением природного газа изучалась ранее, тогда как Теплопередача Излучением смеси ацетилен / природный газ не изучалась. Теплопередаче Излучением при горении природного газа было присвоено значение 0,20, тогда как для горения природного газа с ацетиленом было присвоено значение 0,30.

Измерения: Во время серии испытаний NBS/НБС использовались только два типа измерений, поскольку уверенности в результатах других измерений было меньше. В данном случае измерялись температура и глубина HGL /Слой Горячего Газа/. Для этого использовались открытые термопары. Измерения температуры в одной точке горящей комнате не использовались при построении алгоритмов дыма или потолочных спринклеров. Это связано с тем, что в любом случае геометрия не соответствовала предположениям, использованным в модельных алгоритмах потоков или струй. В частности, горелка была установлена на стене, и отношение ширины помещения к высоте было меньше, чем предполагалось различными корреляциями потолочных спринклеров.

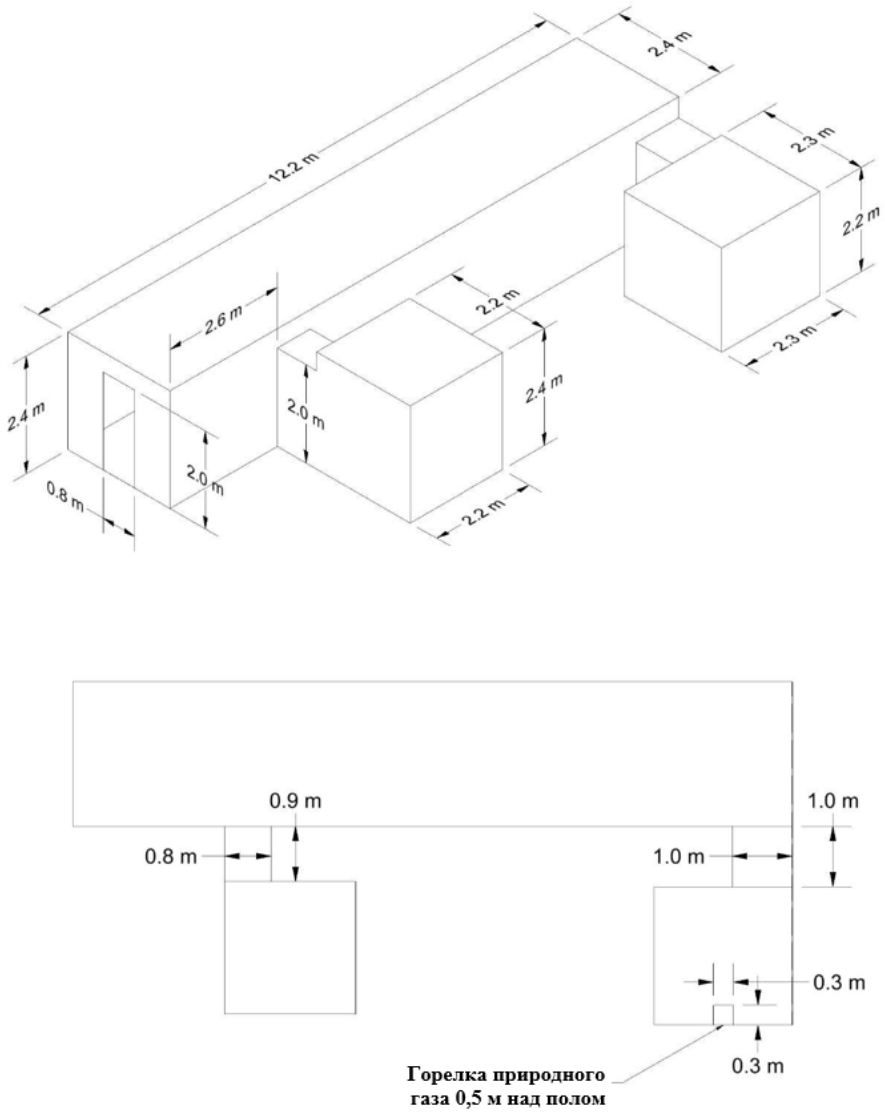

Рис. 2: Геометрия конструкций в NBS/НБС многокомнатных экспериментах

4.3. Исследование вентиляционных отверстий NIST

Серию из 15 экспериментов на коробке уменьшенного масштаба выполнили летом 2017 года участники программы летних студенческих исследований (SURF) Фатима Фарзана и Кори Шованец. За исключением представленной здесь информации, не существует отчетов по испытаниям или докладов с описанием этих экспериментов.

Геометрия коробки

Чертеж коробки представлен на рисунке ниже в этом разделе. Коробка состояла из двух отсеков, установленных друг на друга. Внутренние поперечные размеры каждого отсека – 119 см на 121 см. Высота нижнего отсека – 59 см, высота верхнего отсека – 61 см. Коробка находилась в вентилируемом лабораторном помеще-

нии размером приблизительно 3 м на 3 м и 2,8 м высотой. Пол этого помещения был выложен плиткой, но один лист гипсокартона выполнял функцию пола нижнего этажа испытательной коробки.

Передняя дверь была открыта во всех экспериментах. В некоторой части некоторых экспериментов второй этаж был полностью герметизирован. Площадь утечки составляла приблизительно 18 см2 при измерении с избыточным давлением 25 Па.

Свойства материалов

Стены, потолок и пол каждого отсека были выполнены из гипсокартона типа X толщиной 1,6 см (5/8 дюйма). Деревянные бруски образовывали наружный каркас. Термофизические свойства гипсокартона были взяты из ист. **[205]** и публикаций изготовителя. Было принято, что удельная теплоемкость равна 1,089 кДж/(кг • K), теплопроводность 0,15 Вт/м/K и плотность 673 кг/м3. Кроме того, слой каолиновой ваты, показанный на рисунке ниже в этом разделе, использовался для уплотнения зазора между съемной крышей и стенками второго этажа. Алюминиевая лента использовалась для герметизации всех остальных стыков.

Горелка

Во всех экспериментах квадратная пропановая горелка 10 см с расходом топлива 1,65 л/мин создавала возгорание мощностью 2,5 кВт в соответствии со следующим расчетом:

$$1.65\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{min}} \times \frac{1}{60}\frac{\mathrm{min}}{\mathrm{s}} \times \frac{1}{1000}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{L}} \times 1.967\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \times 46,300\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} = 2.50\,\mathrm{kW} \qquad (3.5)$$

Обратите внимание, что для регулятора массового расхода (Sierra Instruments SmartTrak 50) приняты стандартные условия 0 ◦C и 101325 Па. Для испытаний 13-15 вместо регулятора массового расхода использовался расходомер Дуайера. Расходомер имел диапазон расхода 4 л/мин по воздуху.

Термопары

Восемь термопар типа K были установлены на каждом уровне для измерения вертикального температурного профиля. Термопары образовывали вертикальную группу на расстоянии 84 см от левой стены коробки и 17 см от передней стены. «TC-1» обозначена самая верхняя термопара, высота которой определяется как вертикальное расстояние от пола данного отсека.

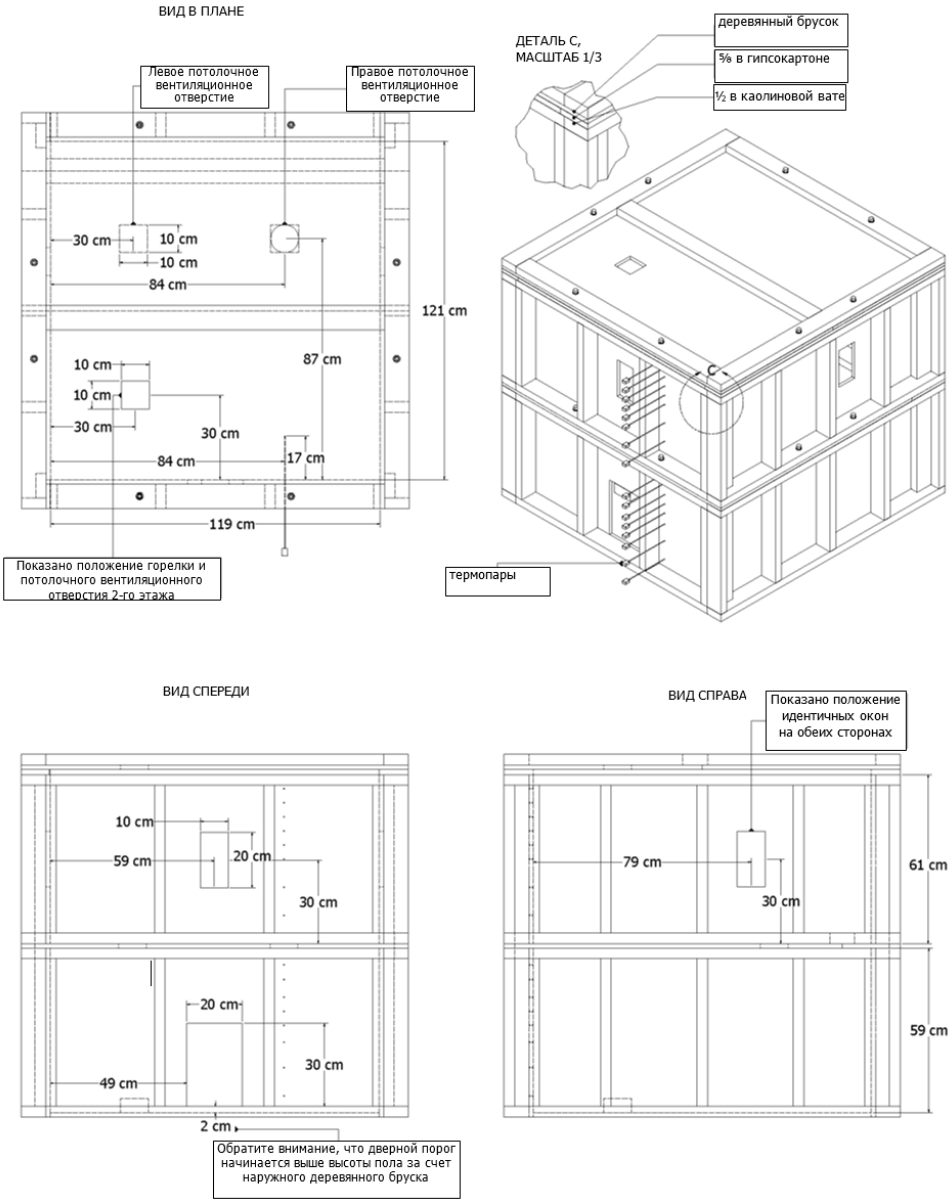

Рис. 3: Высота термопар над полом каждого уровня коробки

Процедура испытания

Каждый эксперимент длился 100 минут с периодом охлаждения 5 минут. В Таблице ниже показано время, когда вентиляционные отверстия и окна открывались после начала каждого эксперимента. Для испытания № 1-4 выполнялись две попытки. В каждом случае разница температур оставалась в пределах 3 процентов, разница меньше 1 ◦C. По этой причине дальнейшие повторы не проводились.

Испытание №	Переднее Окно (мин.)	Левое Окно (мин.)	Правое Окно (мин.)	Левое Вентиляционное отверстие (мин.)	Правое Вентиляционное отверстие (мин.)	Левая лощадь Вентиляционного отверстия (см2)	Правая Площадь Вентиляционного отверстия (см2)	Правая Форма вентиляционного отверстия	Крыша Вентиляционного отверстия (мин.)
1	0	0	0	Закрыто	0	0	100	Квадратное	Закрыто
2	0	0	0	Закрыто	20	0	100	Квадратное	Закрыто
3	60	40	Закрыто	Закрыто	20	0	100	Квадратное	Закрыто
4	0	0	0	Закрыто	0	0	400	Квадратное	Закрыто
5	0	0	0	Закрыто	20	0	400	Квадратное	Закрыто
6	60	40	Закрыто	Закрыто	20	0	400	Квадратное	Закрыто
7	0	0	0	0	0	100	400	Квадратное	Закрыто
8	0	0	0	20	40	100	400	Квадратное	Закрыто
9	80	60	Закрыто	20	40	100	400	Квадратное	Закрыто
10	0	0	0	Закрыто	0	0	100	Круглое	Закрыто
11	0	0	0	Закрыто	20	0	100	Круглое	Закрыто
12	60	40	Закрыто	Закрыто	20	0	100	Круглое	Закрыто
13	0	0	0	0	0	100	400	Квадратное	0
14	0	0	0	20	40	100	400	Квадратное	60
15	Закрыто	Закрыто	Закрыто	20	40	100	400	Квадратное	60

Рис. 4: Состояние вентиляционного отверстия в эксперименте: время открытия

4.4. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST

В 2012 году Группа противопожарных технологий в NIST провела в Лабораториях эксперименты по технике безопасности «Underwriters Laboratories» (UL) в Нортбруке, штат Иллинойс, для оценки изменения температуры в помещении при открытии одного или двух квадратных потолочных вентиляционных отверстий 1.2 м **[236]**. Были проведены четыре эксперимента с использованием горелки на природном газе в помещении размером 6,1 м на 4,3 м на 2,4 м с одним дверным проемом. Мощность возгорания изменялась от 500 кВт до 2 МВт, вентиляционные отверстия открывались и закрывались таким образом, чтобы во время четырех экспериментов получился 31 дискретный временной интервал, в котором можно было бы сравнивать результаты моделирования с квазистационарными условиями. В помещении имелись две вертикальные группы термопар, дверь и вентиляционные отверстия были оборудованы термопарами и двунаправленными датчиками скорости. В валидационном исследовании использовались только данные термопар. Схема помещения показана на рисунке ниже. Основные параметры испытания приведены в таблице 3.1 в конце данного раздела.

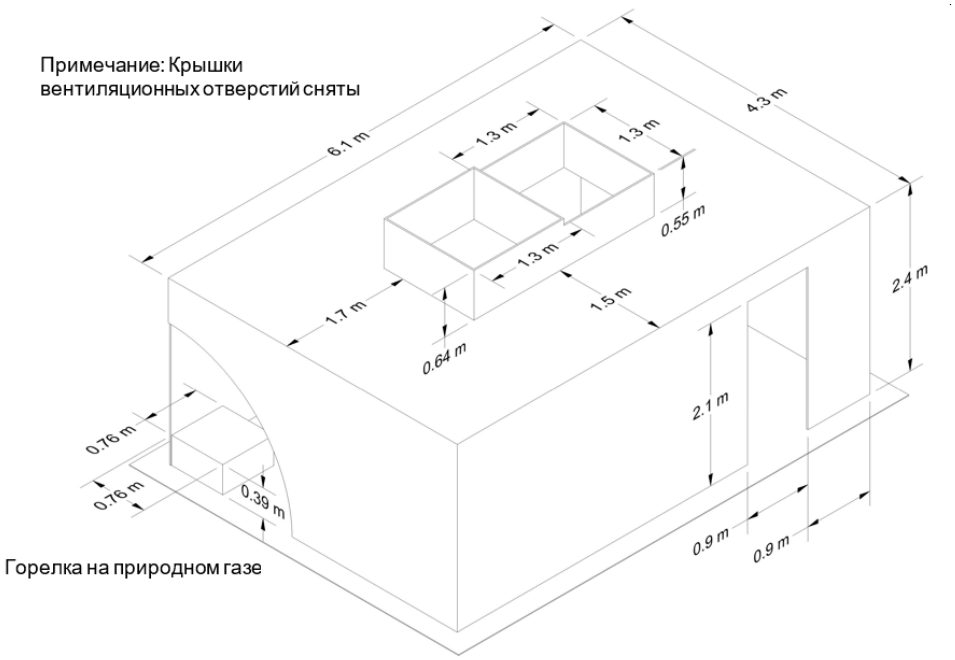

Рис. 5: Геометрия экспериментов UL/NIST

Эксп. №	Время окончания (сек)	Тепловыделение (кВт)	Число вентиляционных отверстий	Эксп. №	Время окончания (сек)	Тепловыделение (кВт)	Число вентиляционных отверстий
Возгорание 1				Возгорание 3			
1	1215	430	0	14	453	476	0
2	1840	430	1	15	816	476	1
3	2168	430	2	16	1153	476	2
4	2474	430	0	17	1640	1002	0
5	2955	1011	0	18	1936	1002	1
6	3170	1011	1	19	2233	1002	2
7	3604	1011	2	Возгорание 4			
8	3840	1011	0	20	519	1011	0
9	4153	2188	0	21	967	1011	1
10	4284	2188	1	22	1325	1011	2
Возгорание 2				23	1559	470	2
11	565	2144	0	24	1653	470	1
12	833	2144	1	25	2013	470	0
13	931	2144	2	26	2411	470	1
				27	2910	470	2
				28	3399	2188	2
				29	3586	2188	0
				30	3803	2188	1
				31	4035	2188	2

Рис. 6: Краткое описание экспериментов с вентиляционными отверстиями UL/NIST. Обратите внимание, что 31 «эксперимент» на самом деле представляют собой дискретные временные интервалы в течение четырех отдельных возгораний

5. Глава 5

5.1. Температура и глубина HGL

Аналогично другим моделям пожара на базе CFD, FDS не выполняет непосредственный расчет температуры или высоты HGL. Эти построения присущи только двузонным моделям. Тем не менее, FDS дает прогноз температуры газа в тех же точках, что и термопары в экспериментах, и эти значения можно преобразовать так же, как экспериментальные измерения, чтобы получить «среднюю» температуру и высоту HGL. Вне зависимости от достоверности метода приведения, результаты расчета FDS для температуры и высоты HGL должны отражать точность его прогнозов измерений индивидуальных термопар, использованных в приведении HGL. Измерения температуры из экспериментов, приведенных в этой главе, используются для расчета температуры и высоты HGL, которые сравниваются с FDS. Этот же метод приведения слоя, описанный в следующем разделе, используется для всех данных, представленных в этой главе.

5.2. Метод приведения HGL

Инженерам по пожарной безопасности часто требуется определить местонахождение границы между горячим задымленным верхним слоем и более холодным нижним слоем в горящем помещении. Относительно простые модели пожара, часто именуемые *двузонными моделями*, рассчитывают эту величину непосредственно вместе со средней температурой верхнего и нижнего слоев. В модели пожара на базе CFD, такой как FDS, нет двух четких зон, но есть непрерывный профиль температуры. Тем не менее, существуют методы, разработанные для оценки высоты и средней температуры слоя по непрерывному вертикальному профилю температур. Один из таких методов **[270]** заключается в следующем: Рассмотрим непрерывную функцию T (z), определяющую температуру T как функцию высоты над полом z, где z = 0 соответствует полу, а z = H соответствует потолку. Определим Tu как температуру верхнего слоя, Tl как температуру нижнего слоя и zint как высоту границы между ними. Рассчитаем величины:

$$
\begin{aligned}
(H - z_{\text{int}})\, T_{\text{u}} + z_{\text{int}}\, T_{\ell} = \int_0^H T(z)\, dz &= I_1 \\
(H - z_{\text{int}})\, \frac{1}{T_{\text{u}}} + z_{\text{int}}\, \frac{1}{T_{\ell}} = \int_0^H \frac{1}{T(z)}\, dz &= I_2
\end{aligned}
$$

Найдем решение для zint:

$$z_{\text{int}} = \frac{T_\ell (I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_\ell^2 - 2 T_\ell H} \tag{5.1}$$

Пусть Tl будет температурой в самой нижней ячейке сетки, тогда, используя формулу Симпсона, выполним численное интегрирование I1 и I2. Tu определяется как средняя температура верхнего слоя по формуле:

$$(H - z_{\text{int}})\, T_{\text{u}} = \int_{z_{\text{int}}}^{H} T(z)\, dz \tag{5.2}$$

Более подробное описание аналогичных процедур смотрите в ист. **[271]**.

5.3. Коридоры в экспериментах ATF

Коридоры в экспериментах ATF состояли из двух коридоров, расположенных один над другим и соединенных лестничным пролетом. Расчеты температур и глубин HGL были выполнены с использованием трех наборов термопар в нижнем коридоре (ответвления A, B и C) и двух наборов термопар в верхнем коридоре (ответвления G и H).

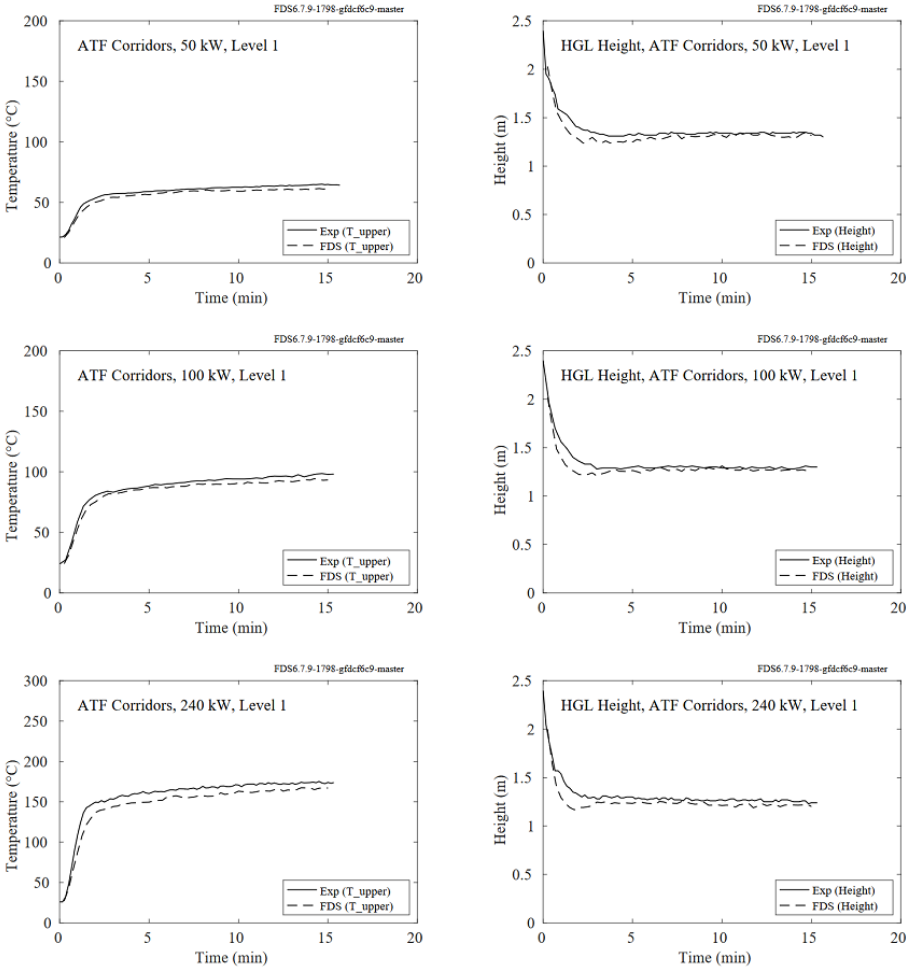

Рис. 7: Коридоры ATF, температура и высота HGL, первый этаж, 50 кВт, 100 кВт, 240 кВт

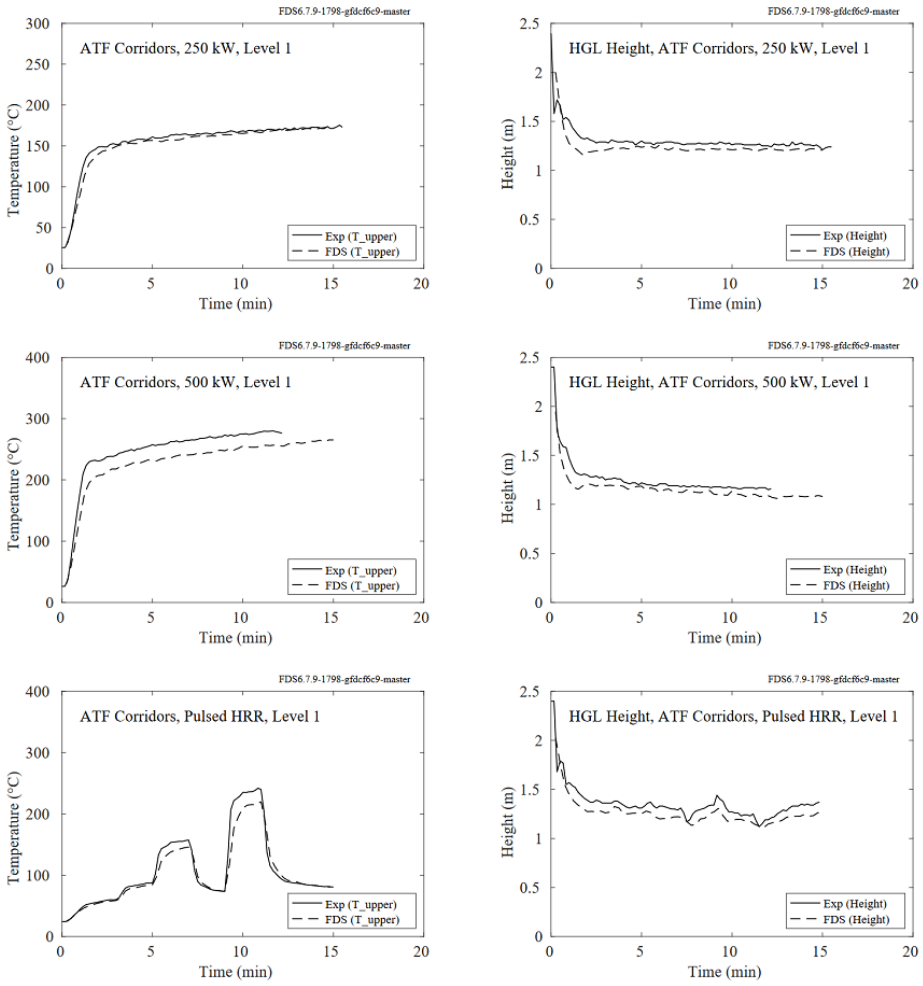

Рис. 8: Коридоры ATF, температура и высота HGL, первый этаж, 250 кВт, 500 кВт, смешанное

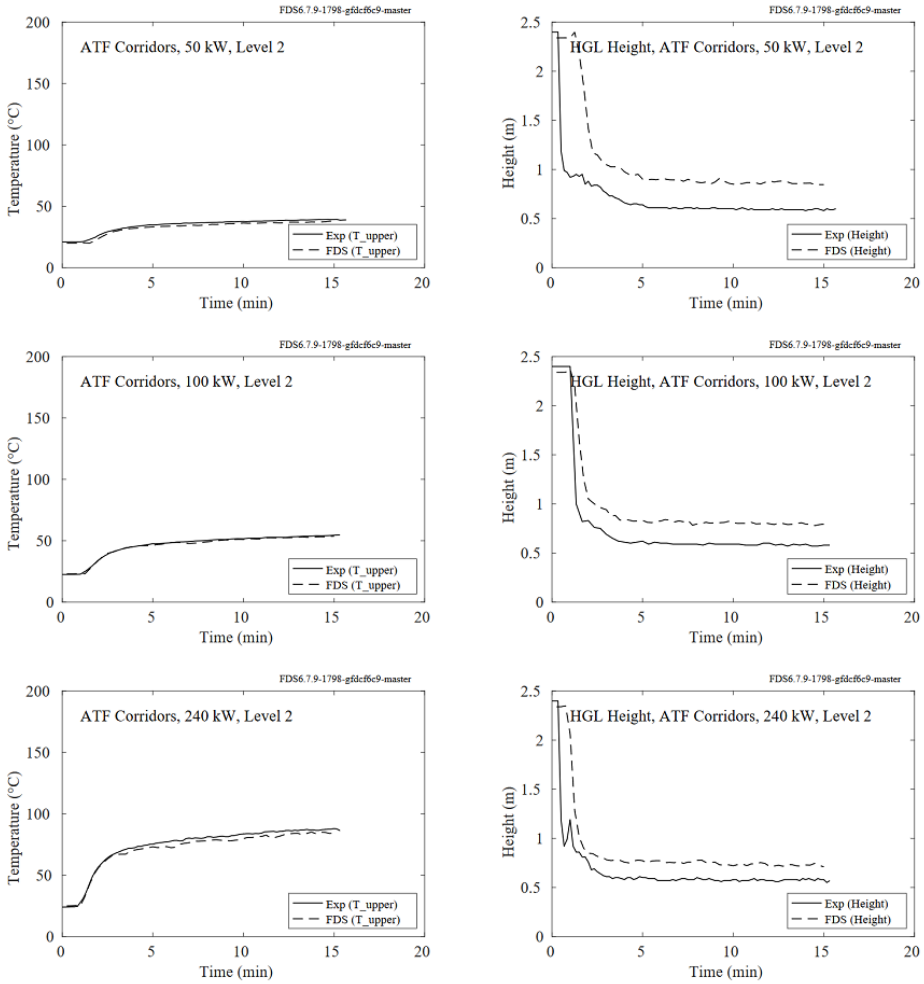

Рис. 9: Коридоры ATF, температура и высота HGL, второй этаж, 50 кВт, 100 кВт, 240 кВт

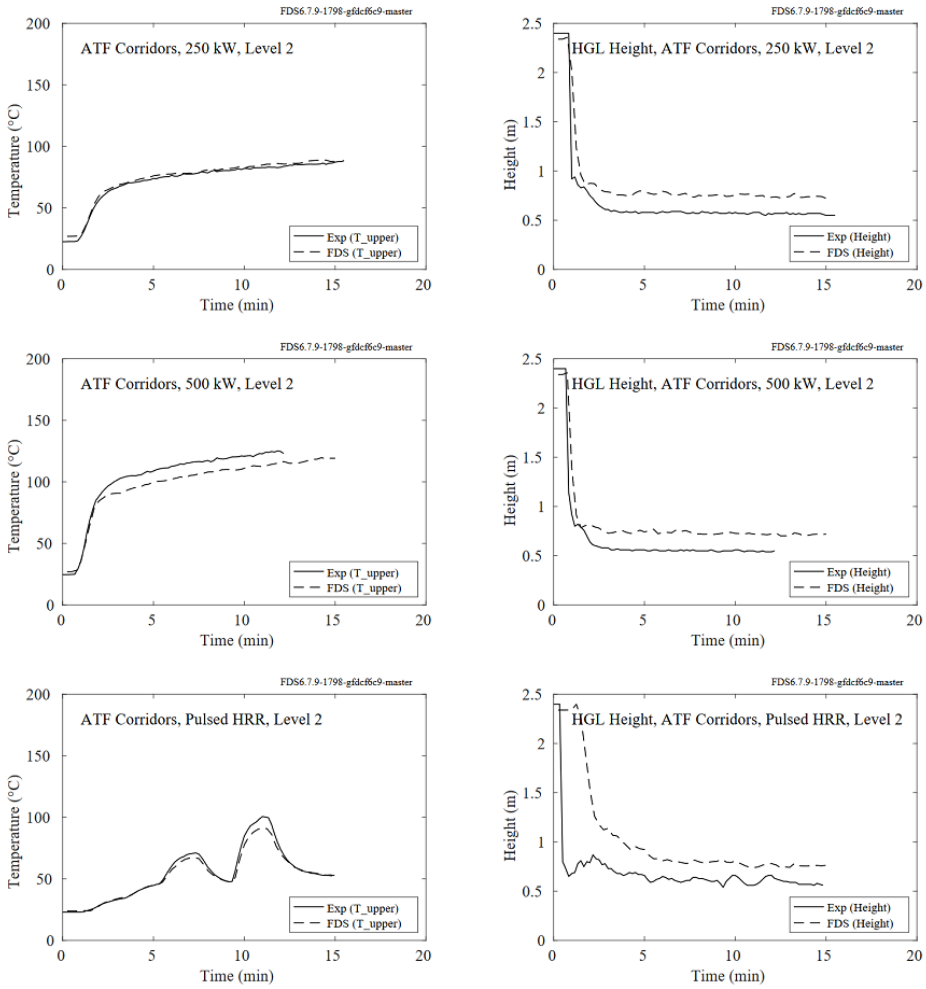

Рис. 10: Коридоры ATF, температура и высота HGL, второй этаж, 250 кВт, 500 кВт, смешанное

5.4. NBS/НБС серия многокомнатных экспериментов

Эта серия экспериментов проводилась в двух относительно маленьких комнатах, соединенных длинным коридором. Возгорание было локализовано в одной из комнат. По всему тестируемому пространству было размещено восемь вертикальных наборов термопар (ветвей): Ветвь 1 - в горящей комнате, ветвь 2 в дверях горящей комнаты, ветви 3,4 и 5 - в коридоре, 6 у выходной двери в дальнем конце коридора, ветвь 7 - в дверях “целевой” комнаты и 8 - внутри “целевой” комнаты. Четыре ветви были выбраны для сравнения с моделью прогноза: Ветвь 1 в горящей комнате, ветви в коридоре и ветвь 8 в “целевой” комнате При испытании 100A и 100O целевая комната была закрыта Руководитель испытаний ограничил информацию по отдельным ветвям термопар, используя альтернативный метод. Эти результаты были включены в изначальный набор данных. Однако, в данном докладе отдельные ветви термопар были исключены за счет использования метода сокращения HGL.

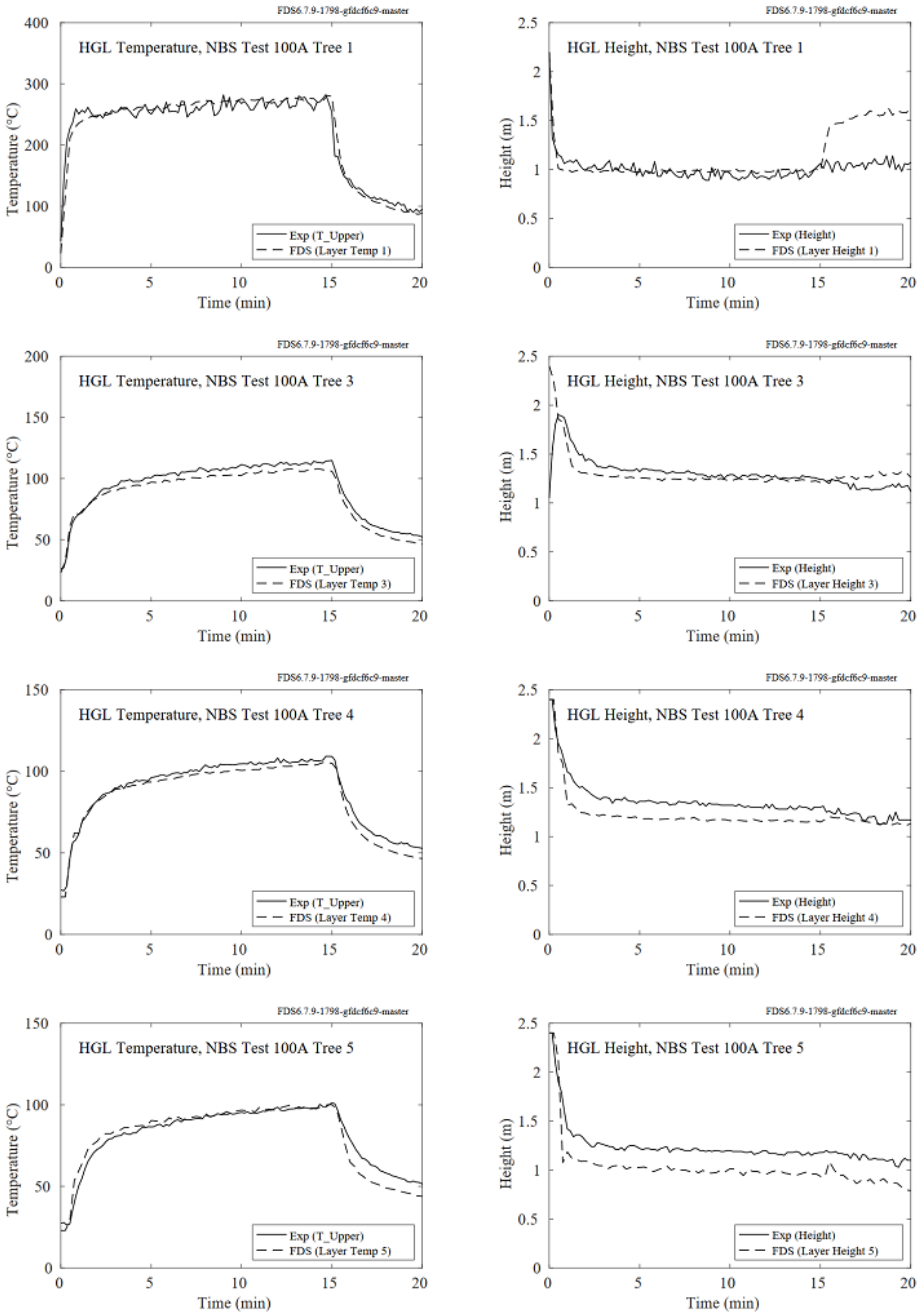

Рис. 11: NBS/НБС многокомнатные эксперименты, температура и высота HGL, тест 100A

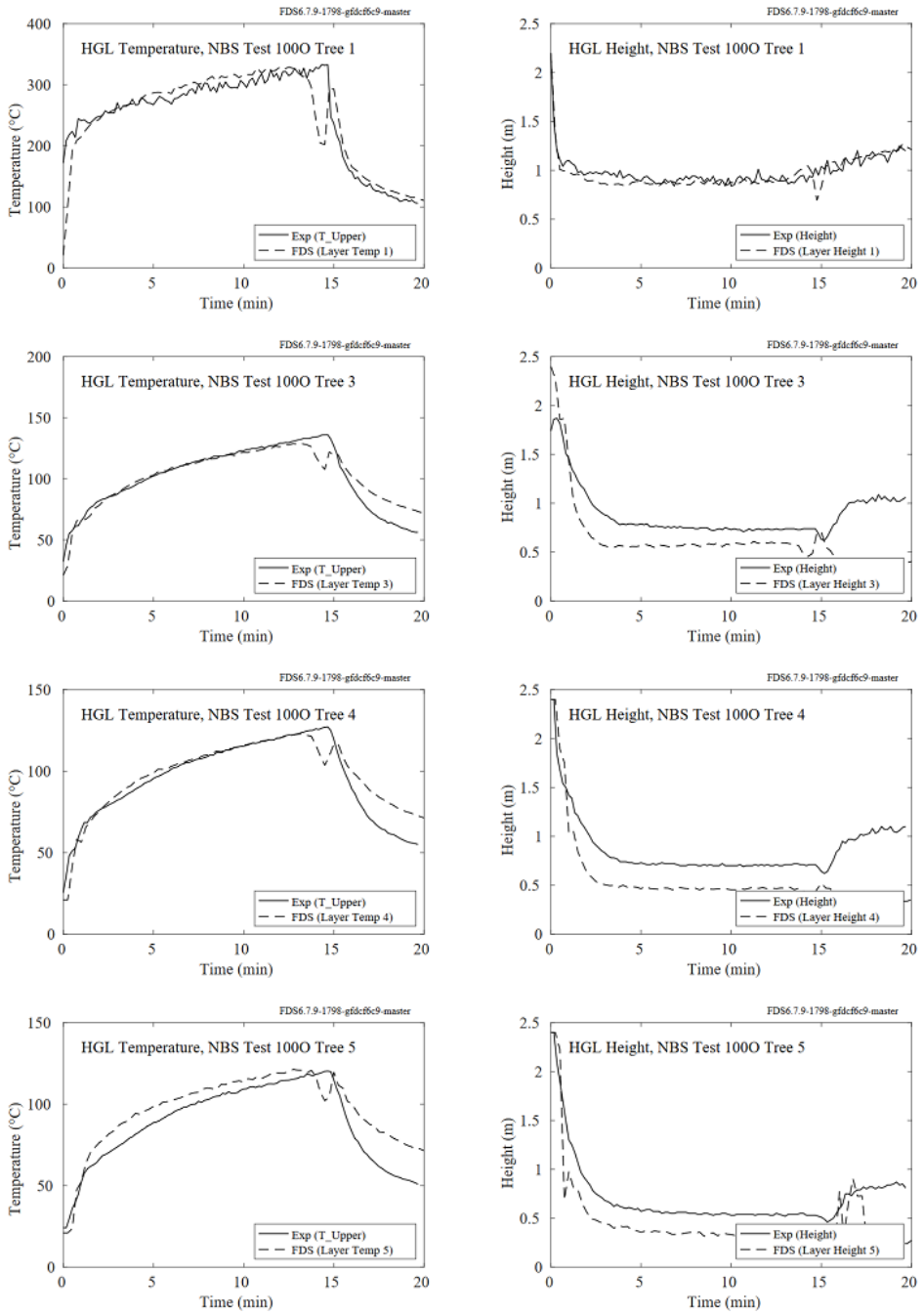

Рис. 12: NBS/НБС многокомнатные эксперименты, температура и высота HGL, тест 100O

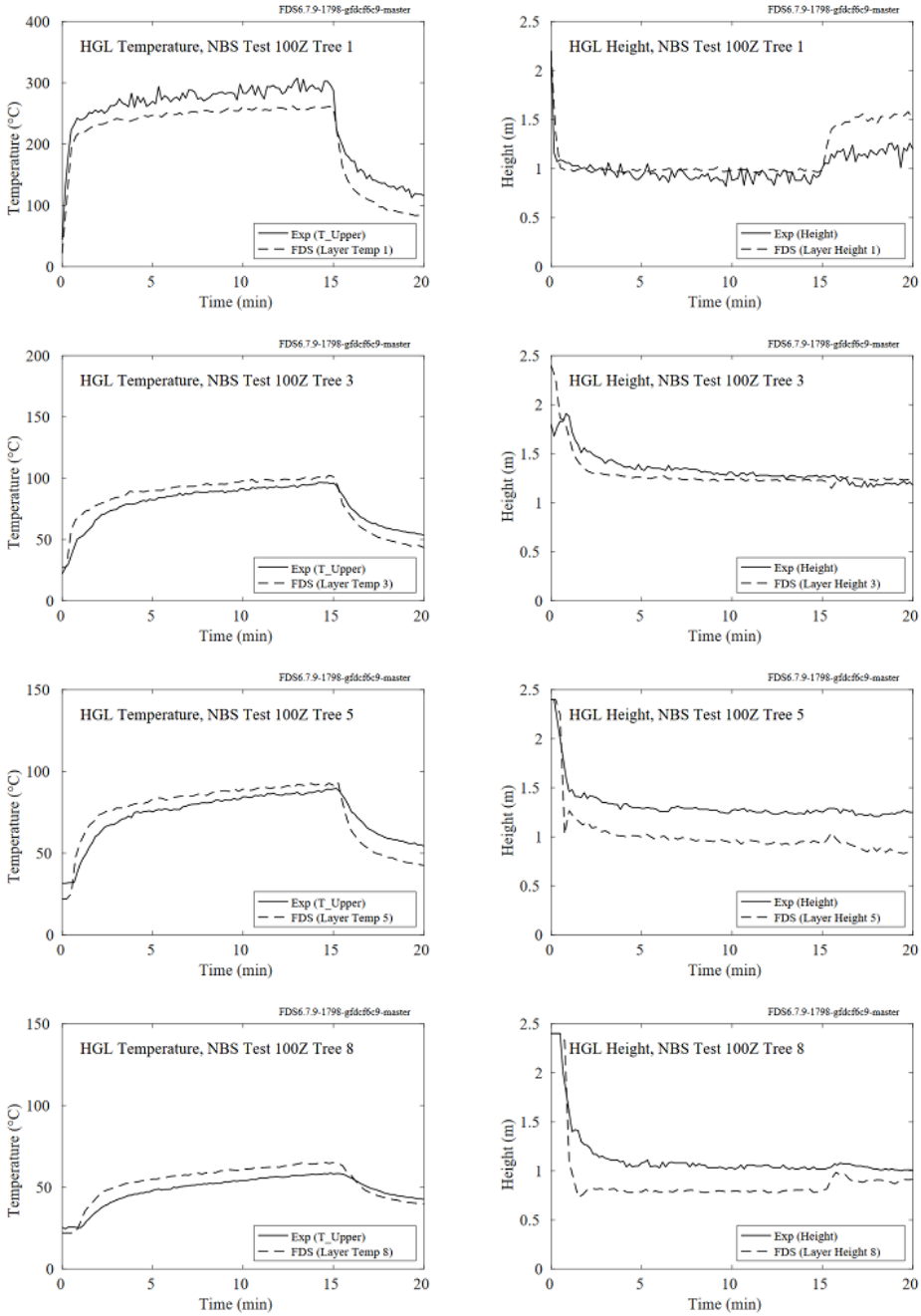

Рис. 13: NBS/НБС многокомнатные эксперименты, температура и высота HGL, тест 100Z.

5.5. Исследование вентиляционных отверстий NIST

Эти эксперименты выполнялись на двухэтажной коробке уменьшенного масштаба, каждый этаж подсоединялся к одному или двум потолочным вентиляционным каналам. На каждом этаже имелась вертикальная группа из восьми термопар в защитной трубке на расстоянии 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 и 50 см от потолка. Было выполнено пятнадцать экспериментов, но моделировались только 12, поскольку в трех экспериментах использовалось круглое вентиляционное отверстие вместо

квадратного, которое невозможно было характеризовать в имитационных моделях FDS. Результаты этих экспериментов были почти идентичными.

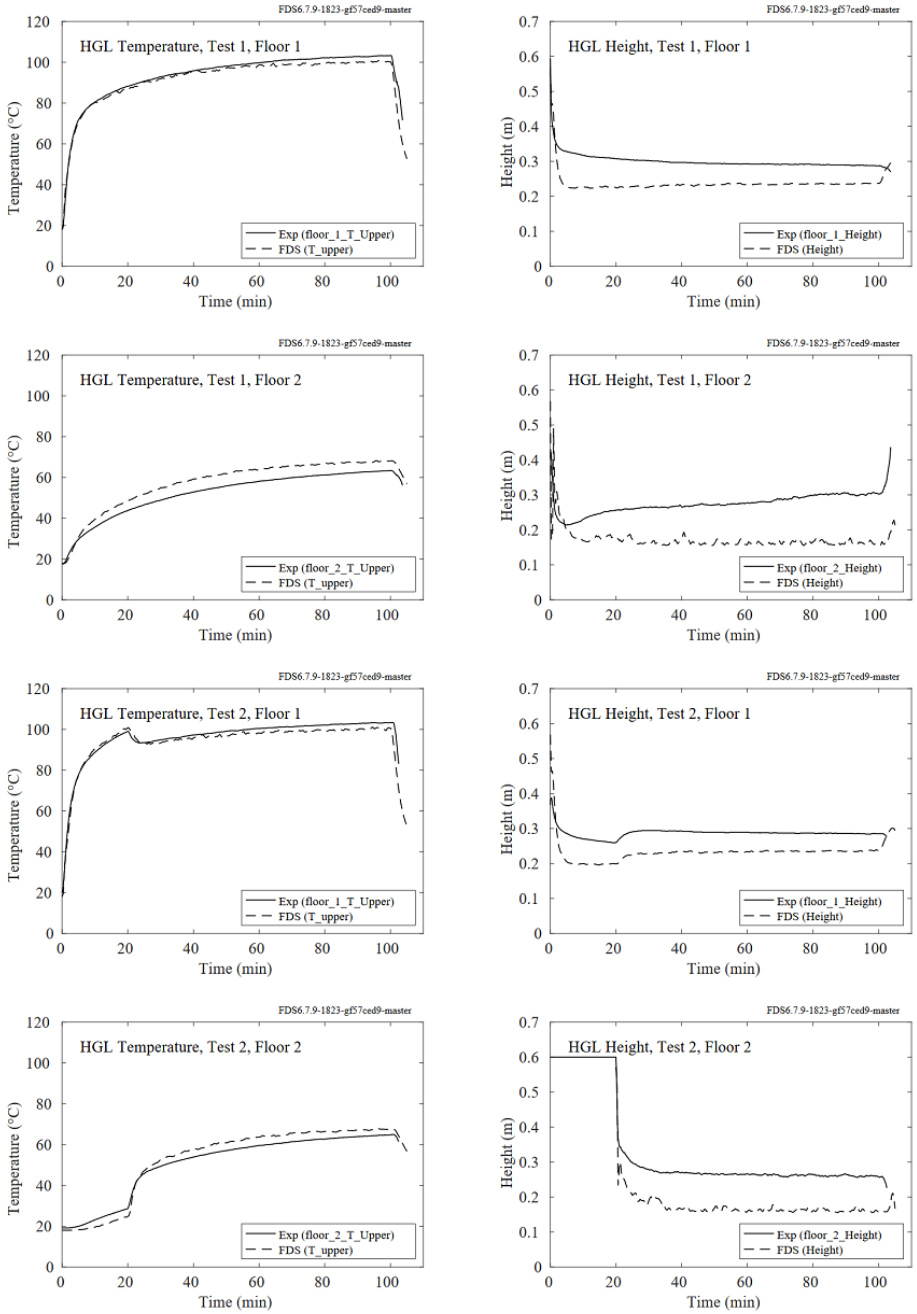

Рис. 14: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 1 и 2

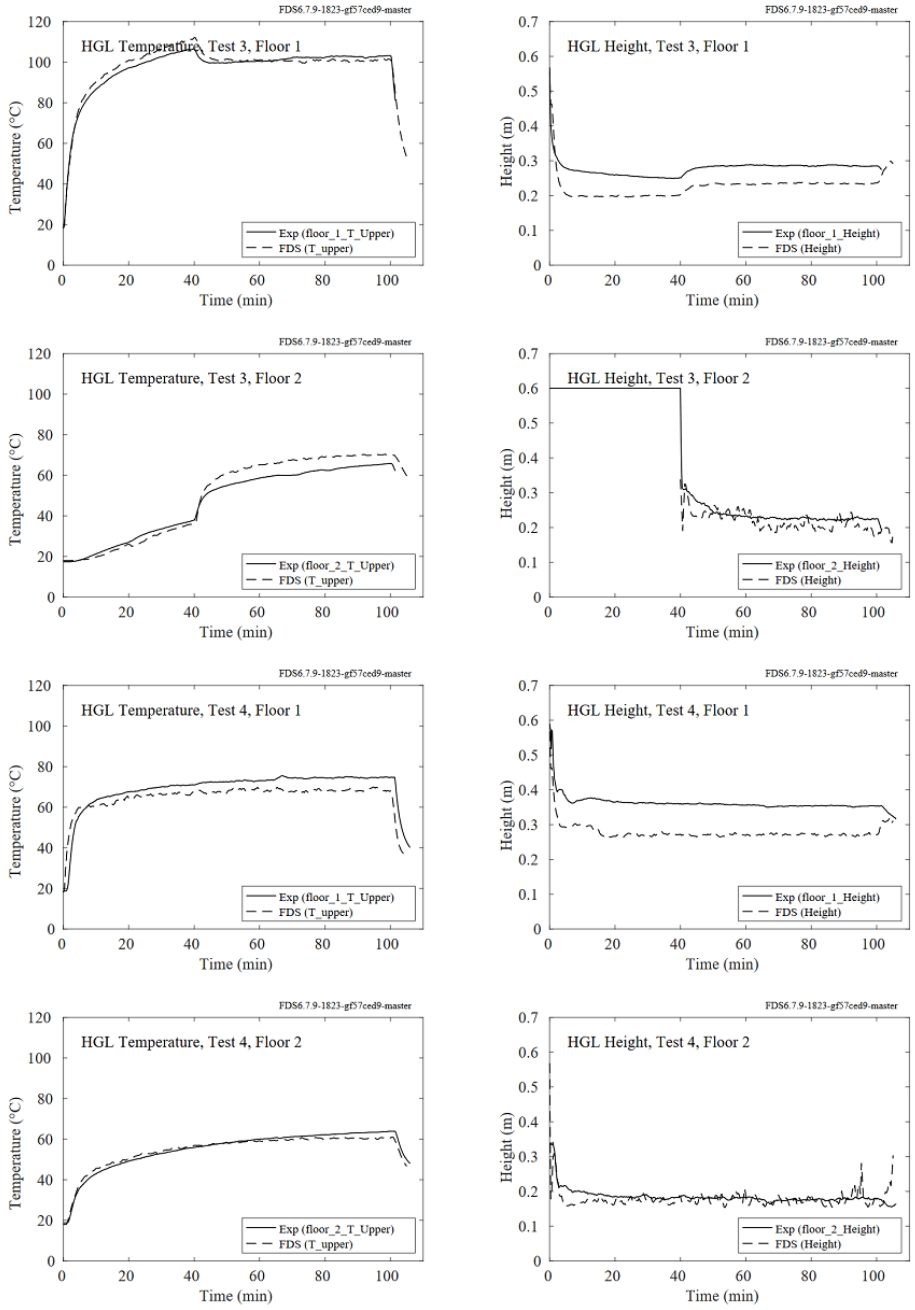

Рис. 15: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 3 и 4

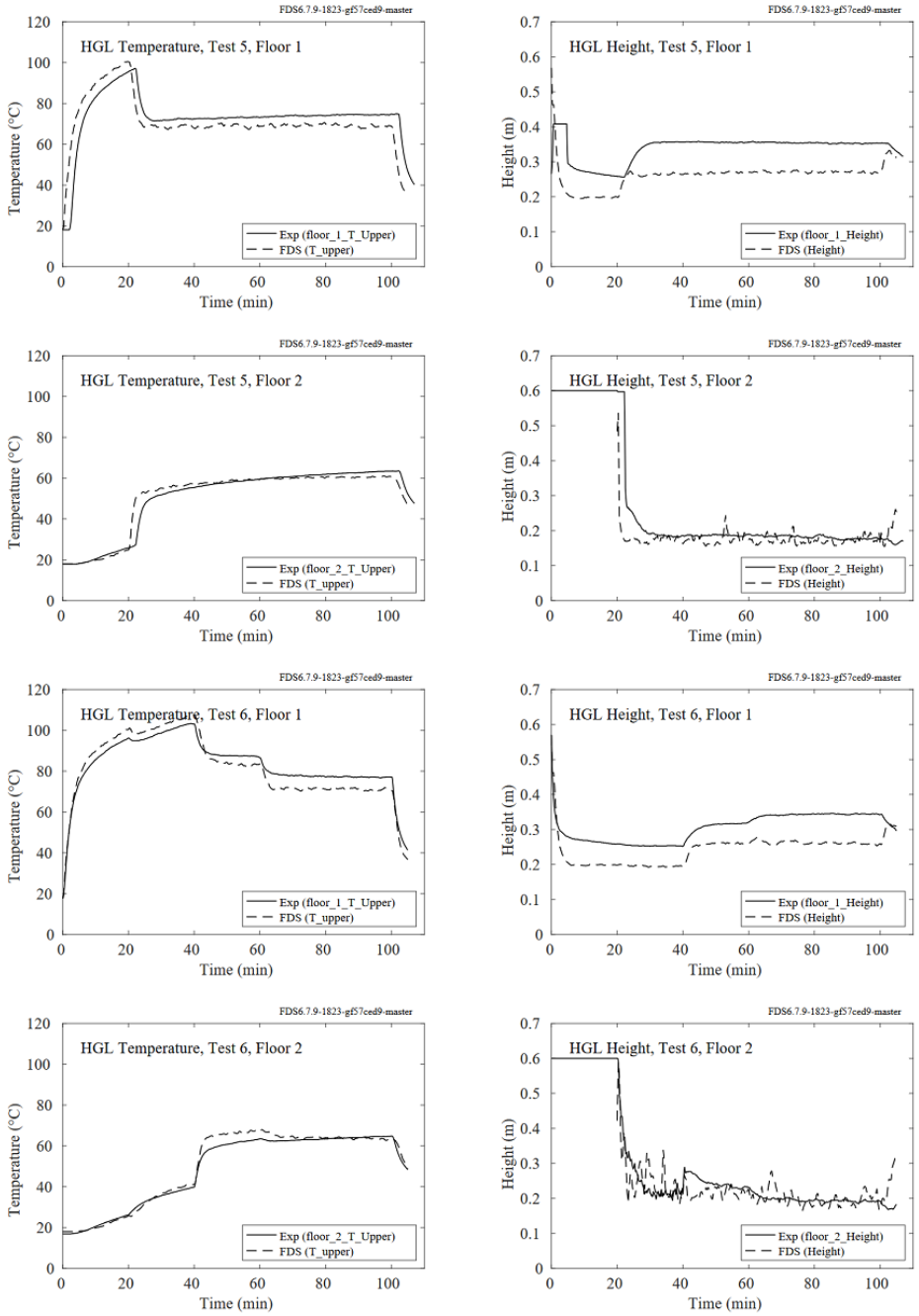

Рис. 16: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 5 и 6

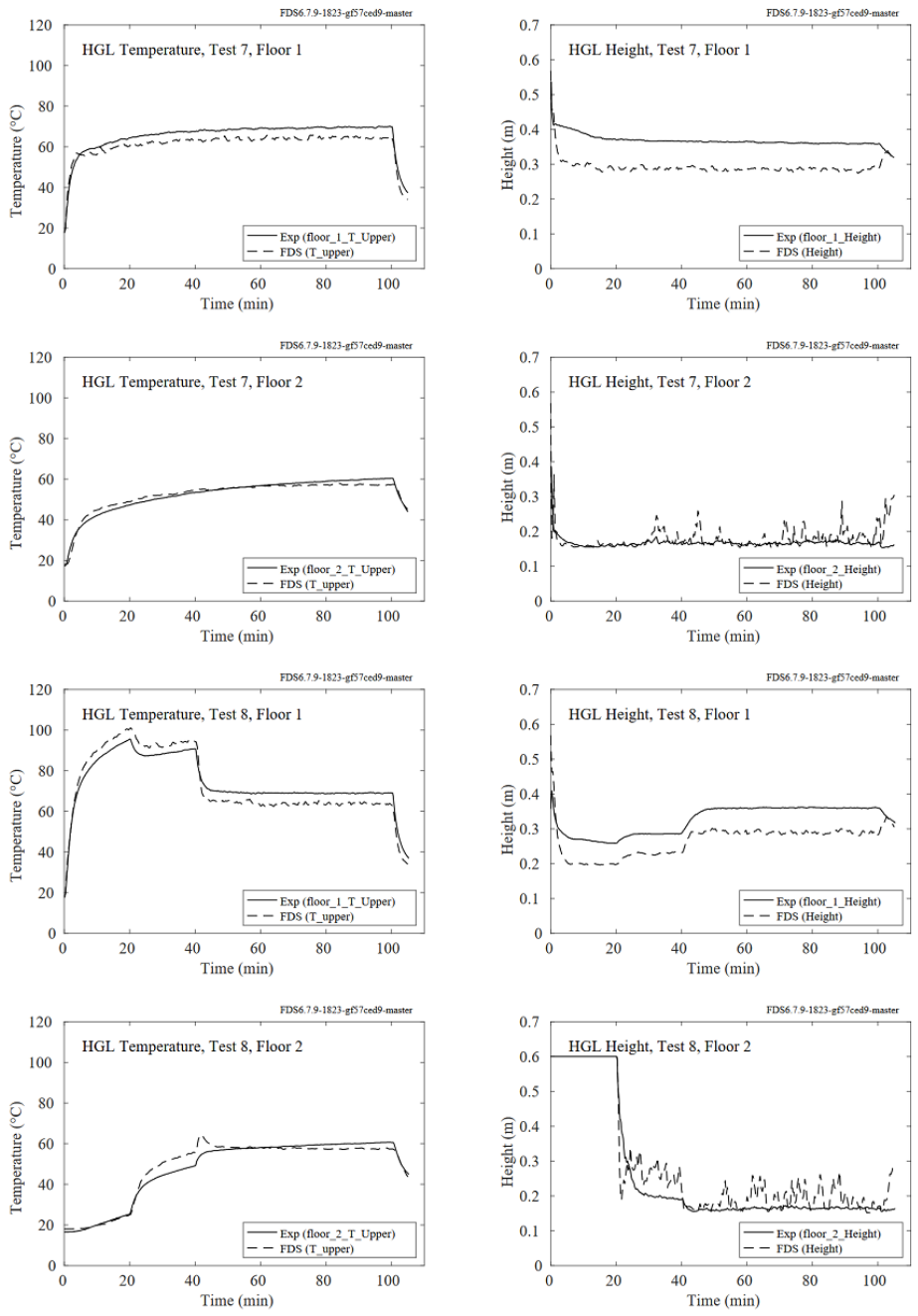

Рис. 17: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 7 и 8

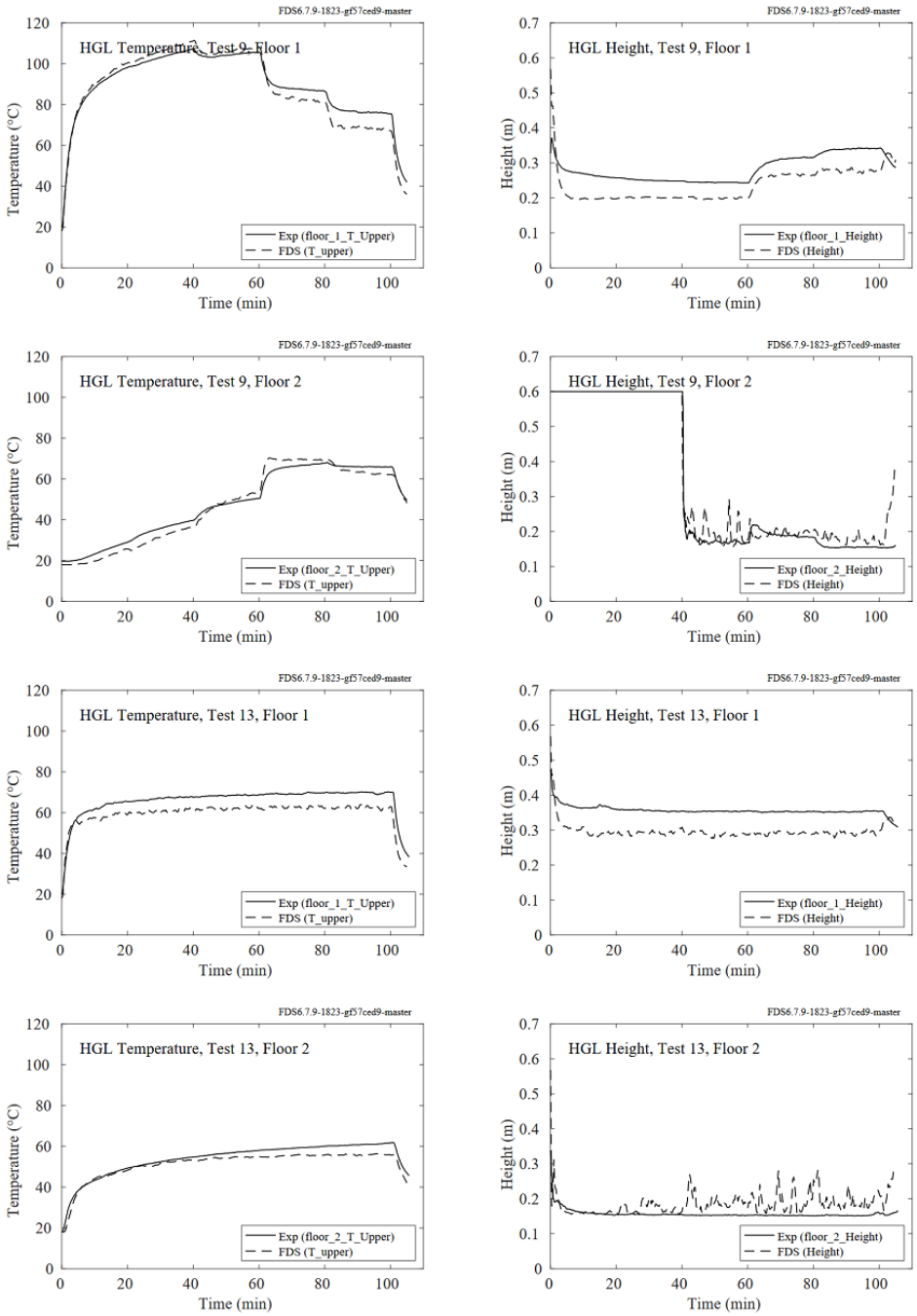

Рис. 18: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 9 и 13

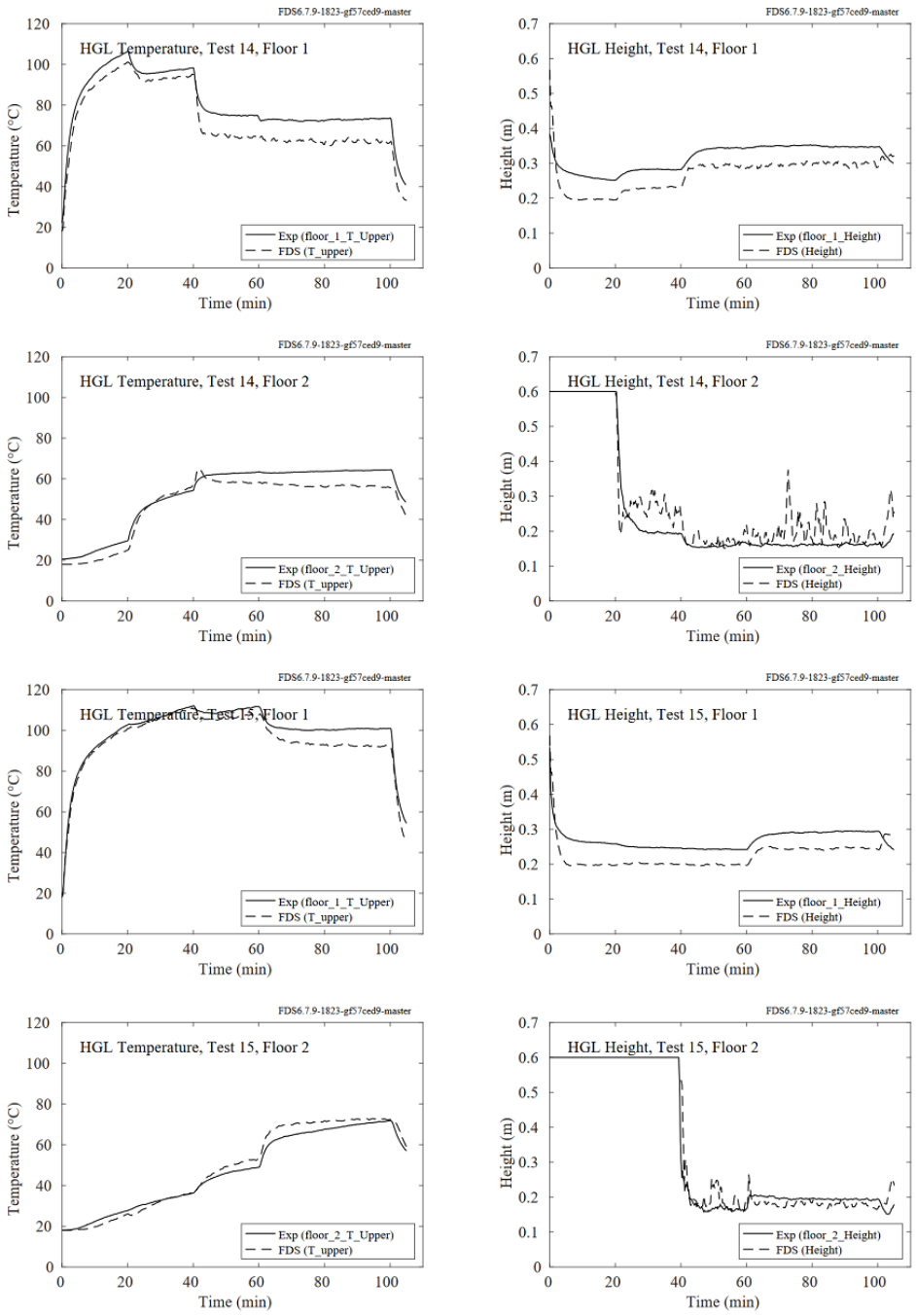

Рис. 19: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура и высота HGL, Испытания 14 и 15

5.6. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST

Температура и высота HGL для четырех экспериментов рассчитывались по данным двух вертикальных групп, по восемь термопар в каждой. Группы располагались на длинной центральной оси помещения на расстоянии 90 см от каждой из коротких стен. Двойное вентиляционное отверстие размером 2,4 м на 1,2 м находилось на расстоянии 90 см от каждой группы. Самая верхняя ТП располагалась на 2,5 см ниже потолка. Вторая ТП располагалась на 30 см (1 фут) ниже потолка,

остальные располагались через равные интервалы в 1 фут.

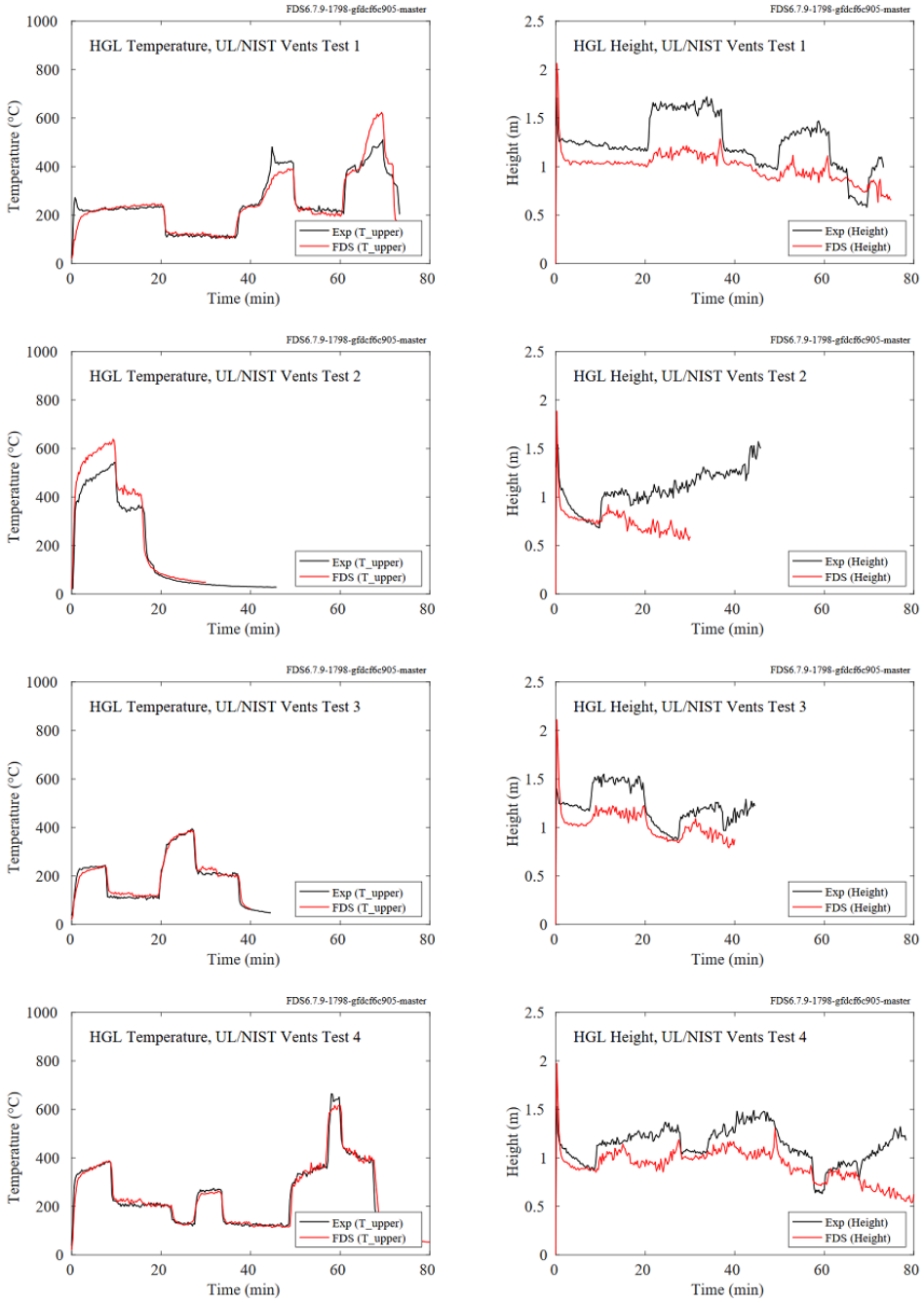

Рис. 20: Исследование вентиляционных отверстий UL/NIST,температура и высота HGL, Испытания 1-4

6. Глава 7

6.1. ATF эксперименты в коридорах

Эта серия экспериментов проводилась в двух достаточно длинных коридорах, соединенных лестницей. Источник огня - газовая горелка - располагался на первом

уровне в конце коридора вдали от лестницы. С этого конца коридор был закрыт и открыт в том же положении на втором уровне. Был образован двухсторонний поток воздуха на обоих уровнях от открытой двери на втором уровне вниз по лестнице на первый. Единственный открытый конец структуры был в конце коридора на втором уровне

Температура измерялась семью ветвями термопар. Ветвь A располагалась достаточно близко в возгоранию на первом уровне. Ветвь B располагалась посредине коридора первого уровня. Ветвь C располагалась вблизи лестницы на первом уровне. Ветвь D располагалась в дверях на лестницу на первом уровне. Ветвь E располагалась приблизительно по центру вертикали лестницы. Ветвь F располагалась вблизи выхода с лестницы на второй уровень. Ветвь G располагалась вблизи выхода с другого конца коридора второго уровня. Графики на следующих страницах показывают результаты измерений термопар нижнего и верхнего уровней, при уровне возгорания в 50 кВт, 100 кВт, 250 кВт, 500 кВт и смешанный “импульсный” HRR/ИТ.

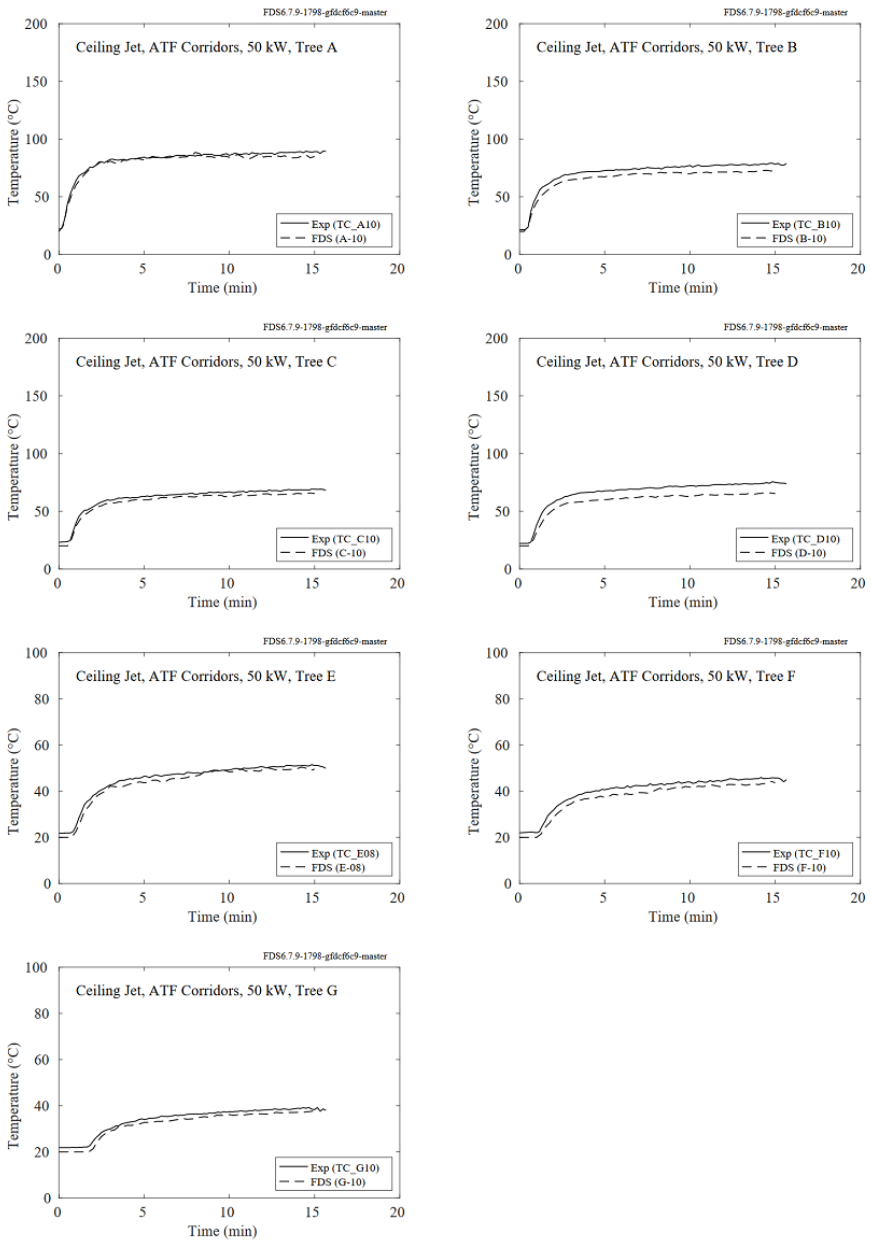

Рис. 21: ATF эксперименты в коридорах. Потол. спринкл. 50 кВт

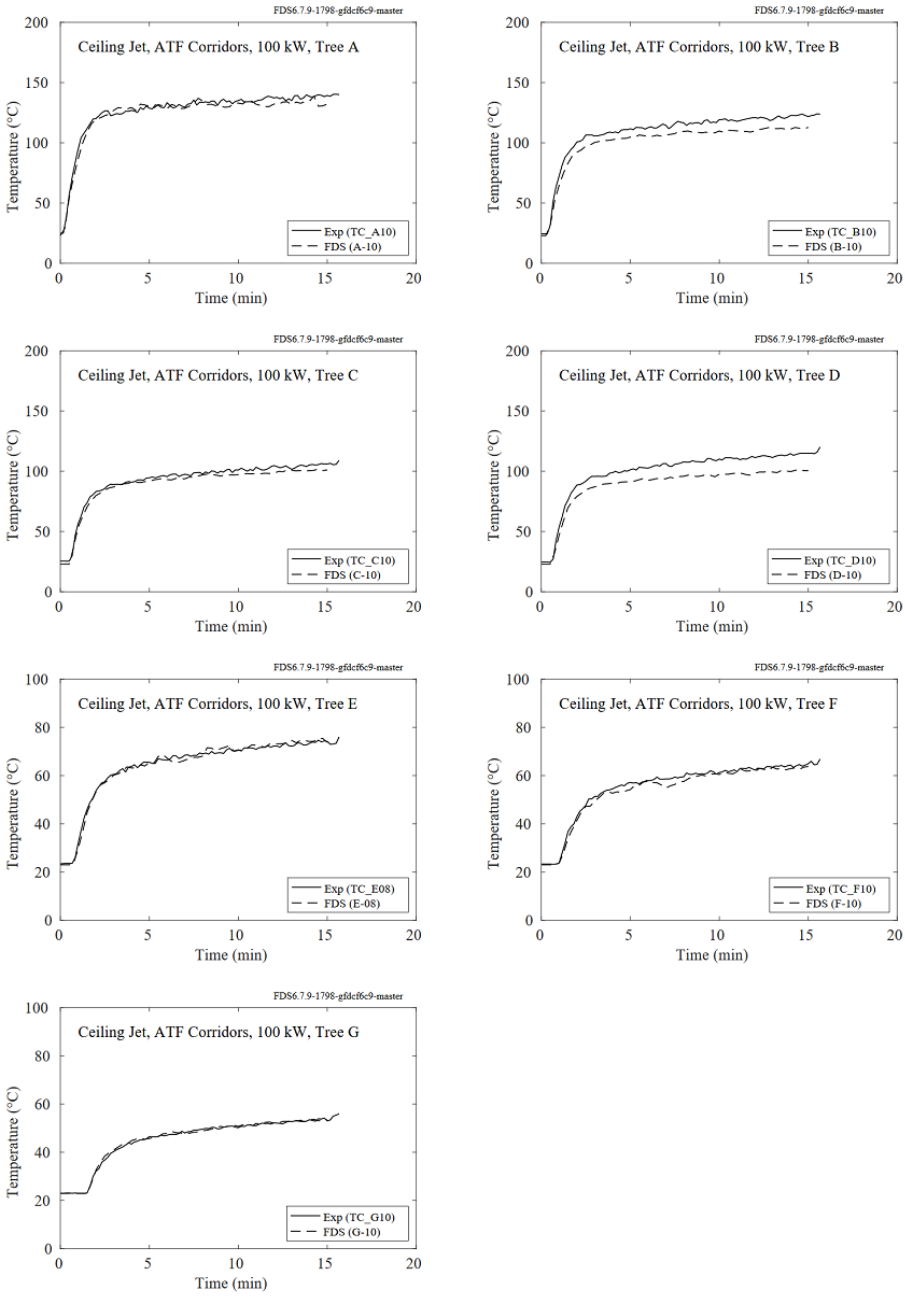

Рис. 22: ATF эксперименты в коридорах. Потол. спринкл. 100 кВт

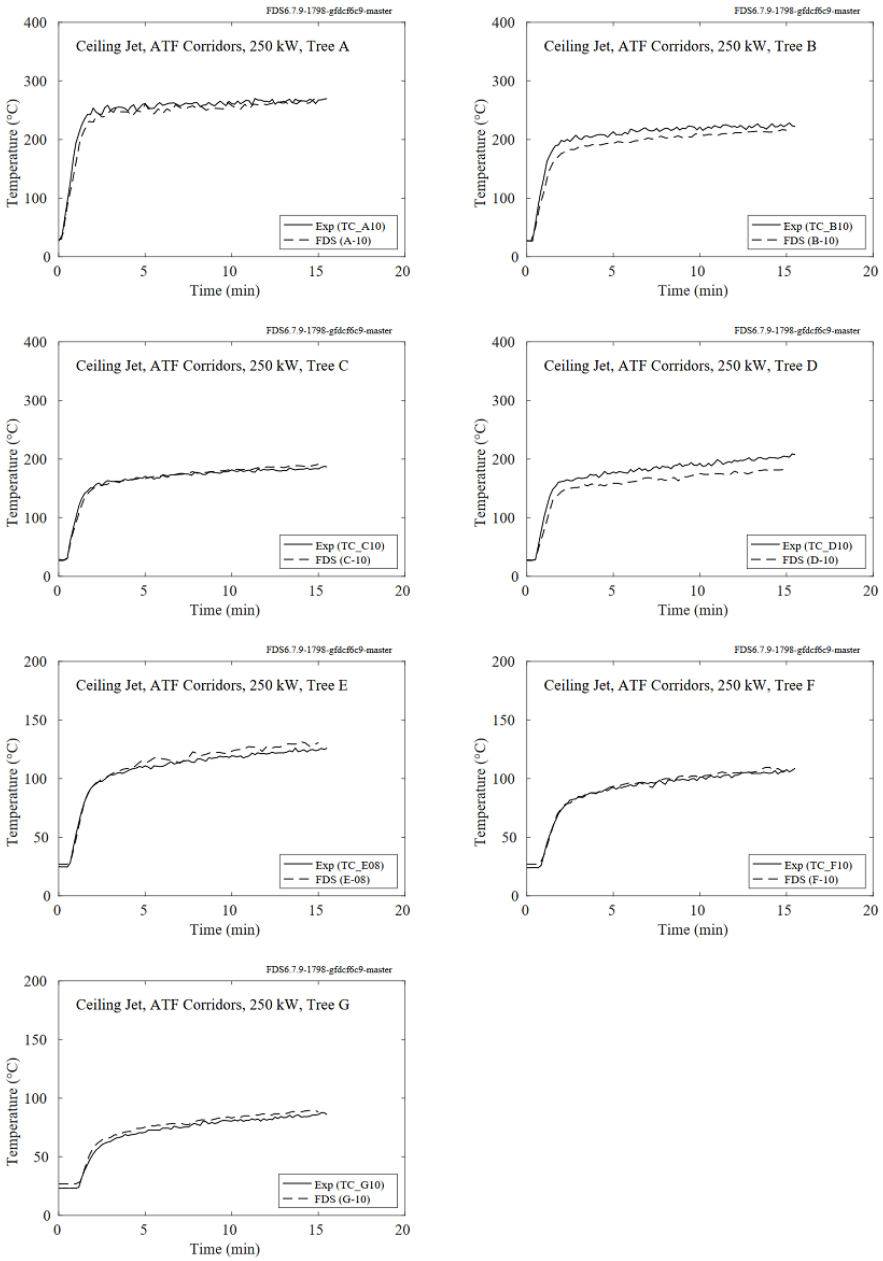

Рис. 23: ATF эксперименты в коридорах. Потол. спринкл. 250 кВт

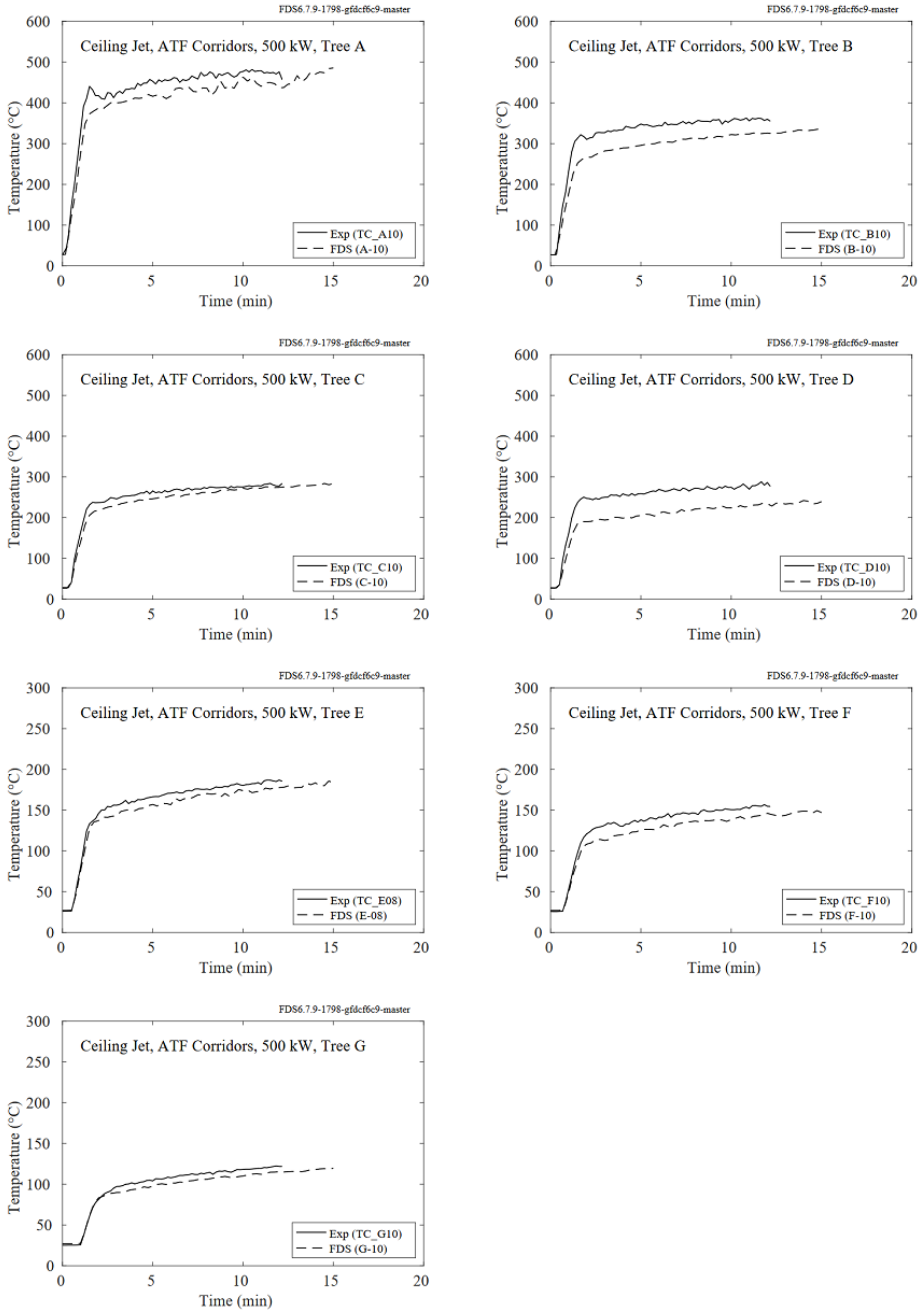

Рис. 24: ATF эксперименты в коридорах. Потол. спринкл. 500 кВт

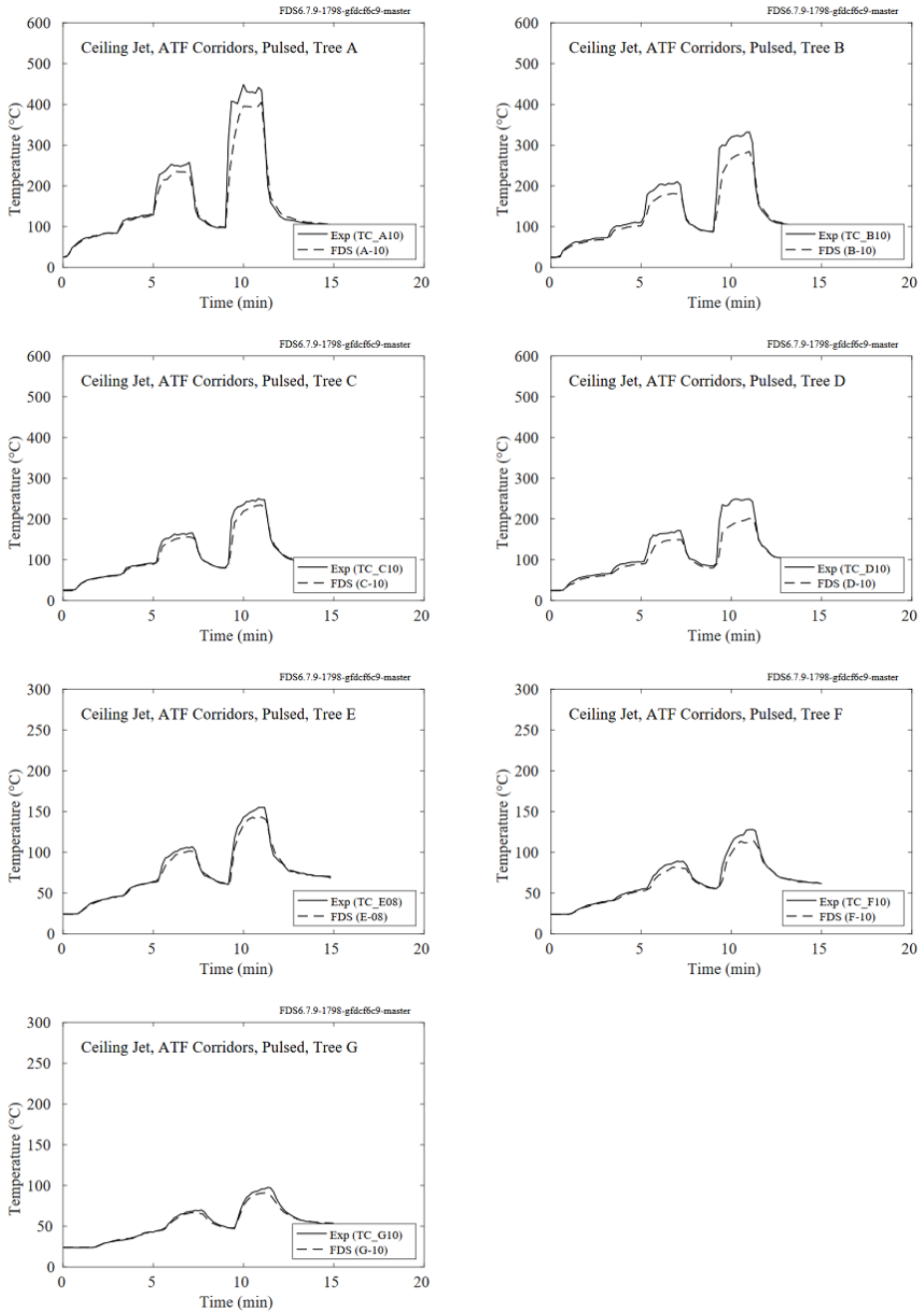

Рис. 25: ATF эксперименты в коридорах. Потол. спринкл. Смешанный HRR/ИТ

6.2. Исследование вентиляционных отверстий NIST

Эти эксперименты выполнялись на двухэтажной коробке уменьшенного масштаба, каждый этажом подсоединялся к одному или двум потолочным вентиляционным каналам. На каждом этаже имелась вертикальная группа из восьми термопар; самая верхняя располагалась на 5 см ниже потолка.

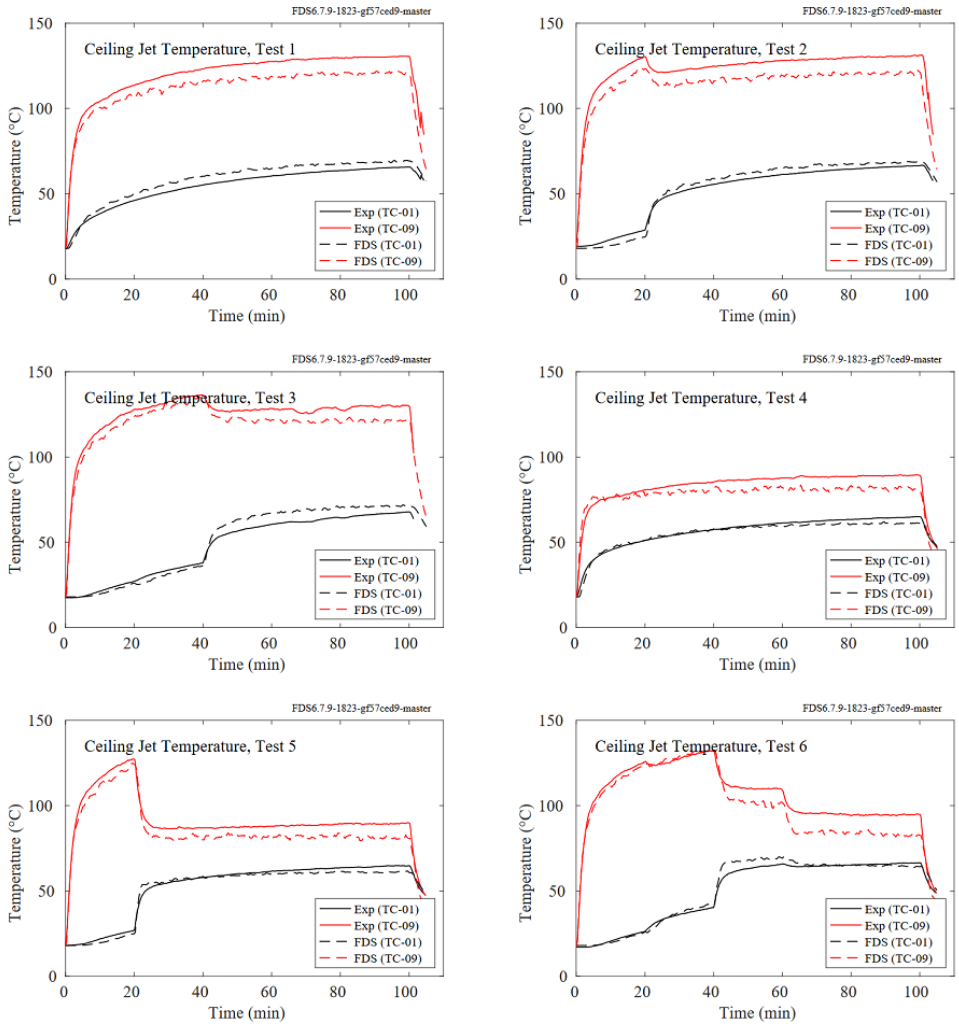

Рис. 26: Исследование вентиляционных отверстий NIST, температура потолочной струи, Испытания 1-6

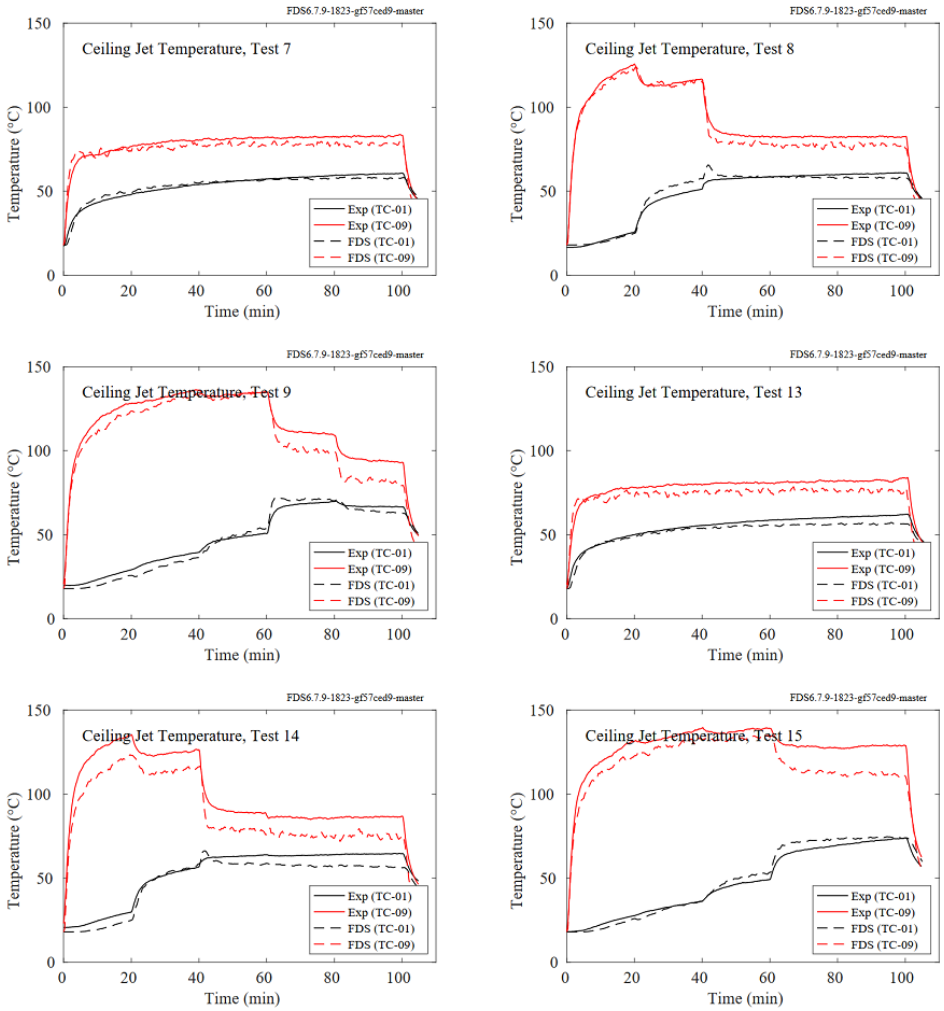

Рис. 27: Исследование вентиляционных отверстий NIST,температура потолочной струи, Испытания 7-9, 13-15

6.3. Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST

Температуры потолочной струи измерялись в двух точках, 90 см от коротких концов двойного вентиляционного отверстия размером 2,4 м на 1,2 м.

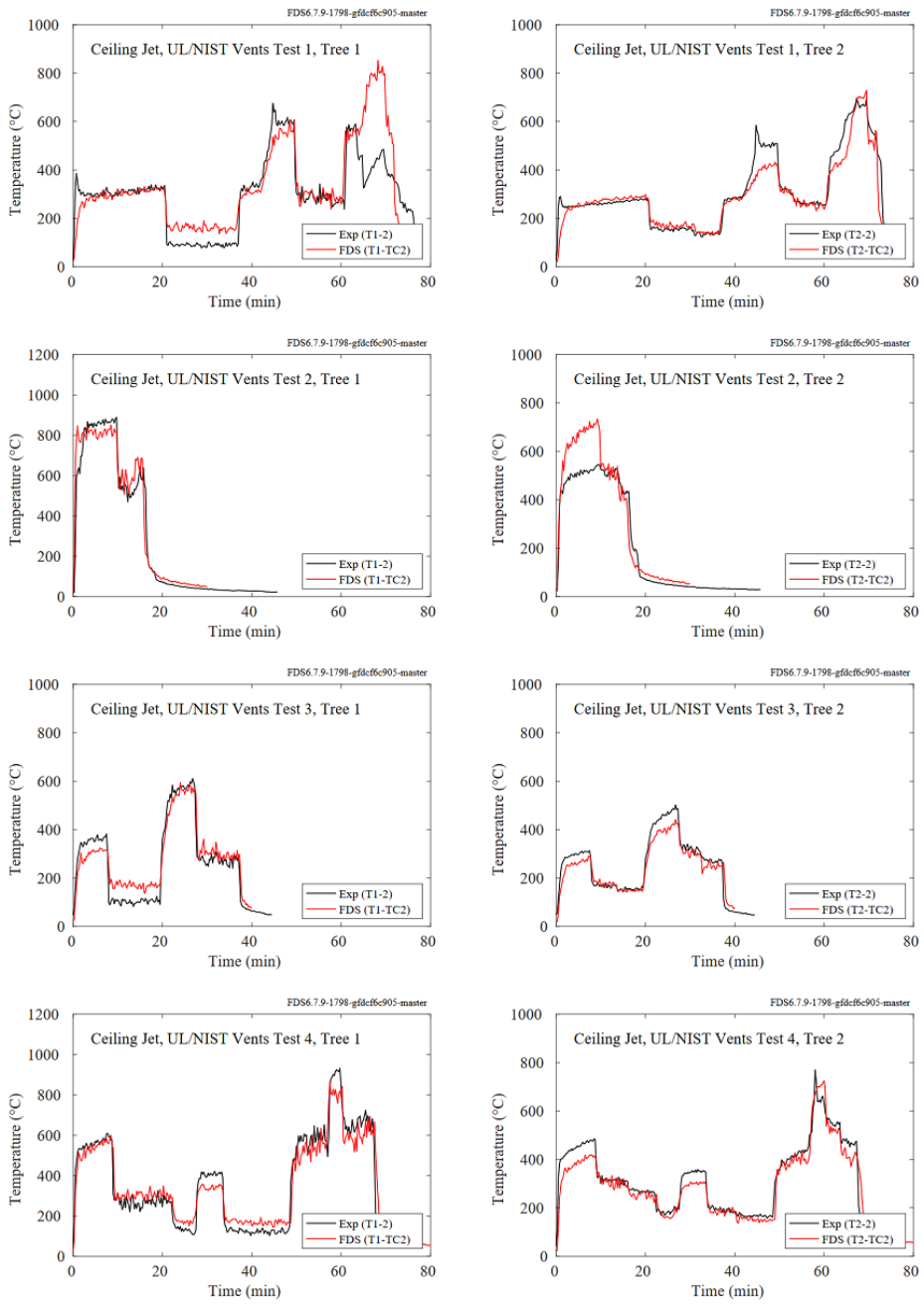

Рис. 28: Эксперименты с вентиляционными отверстиями UL/NIST, потолочная струя

6.4. ATF Эксперименты в коридорах

На следующих страницах представлены сравнения измерений двунаправленной скорости с предсказаниями FDS для экспериментов в ATF коридоре. Измерения скорости проводились в четырех местах: два на первом уровне (ветви H и I) и два на втором уровне (ветви J и K). Представлены самый верхний и самый нижний зонд для каждого вертикального комплекта ТП. Обычно на комплект входят четыре зонда, причем цифра 1 обозначает самый верхний зонд.

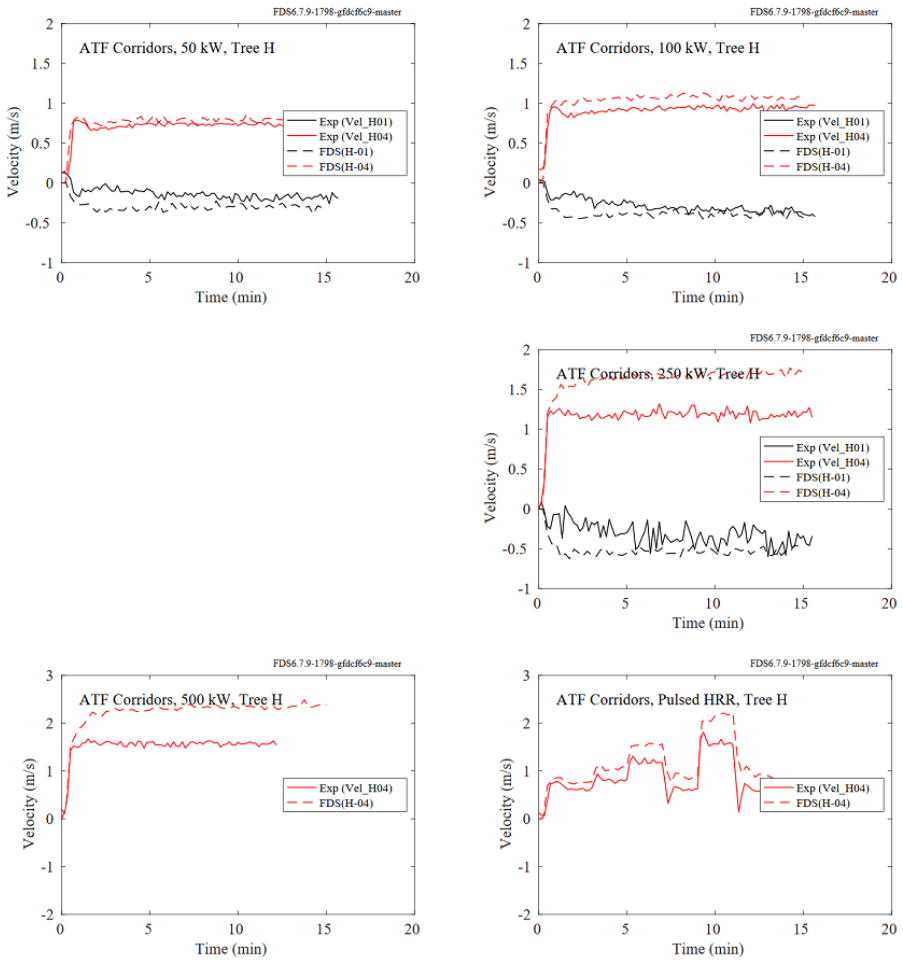

Рис. 29: ATF Коридоры, скорость газа, уровень 1, место H

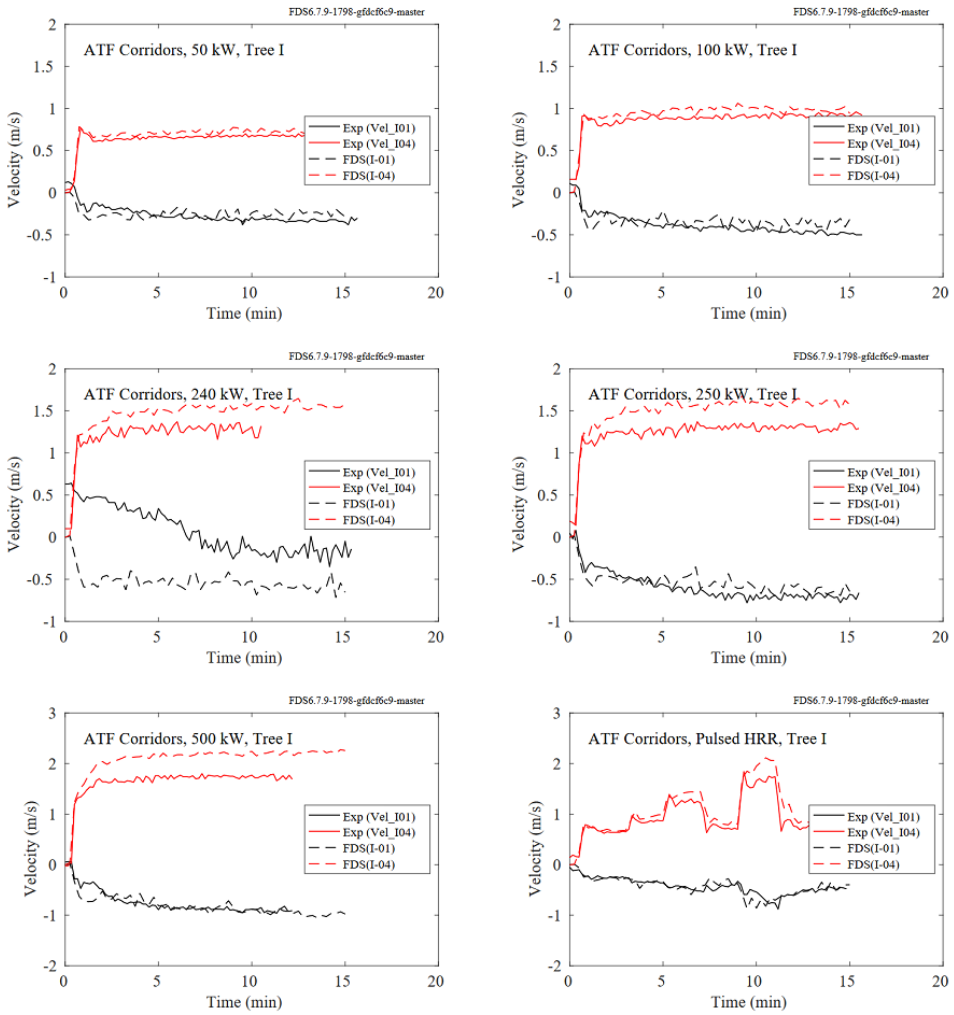

Рис. 30: ATF Коридоры, скорость газа, уровень 1, место I

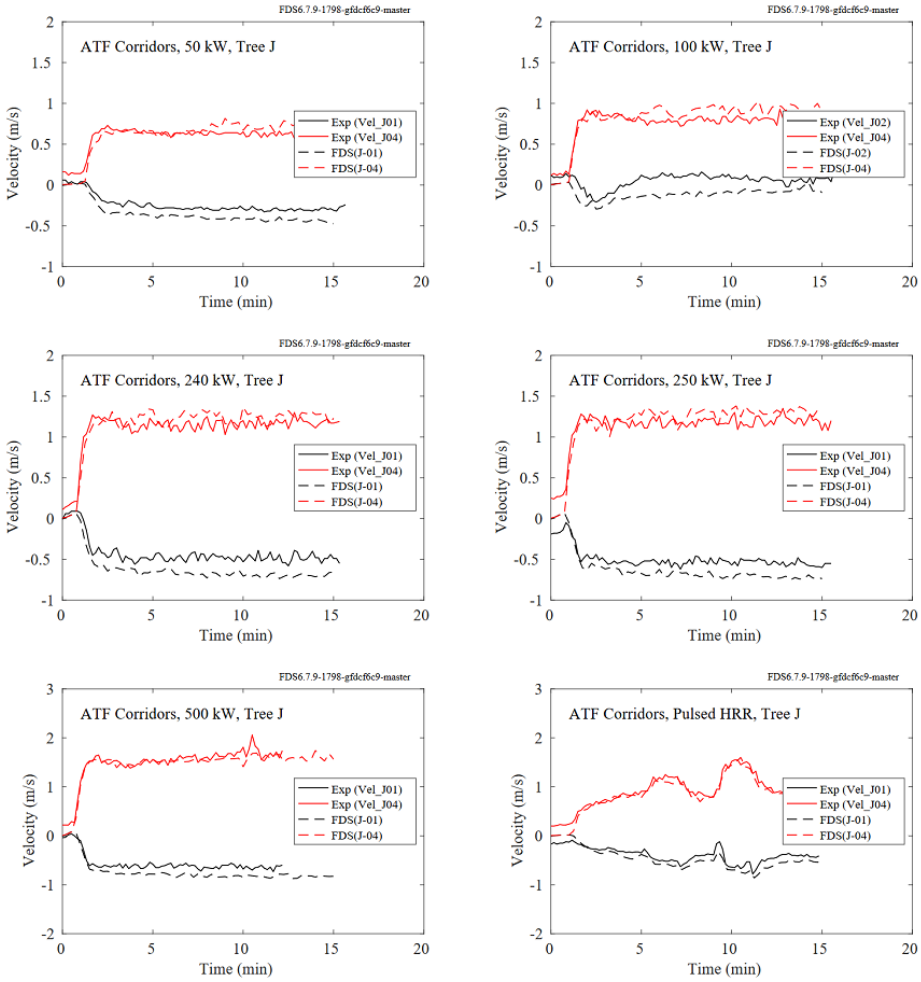

Рис. 31: ATF Коридоры, скорость газа, уровень 2, место J

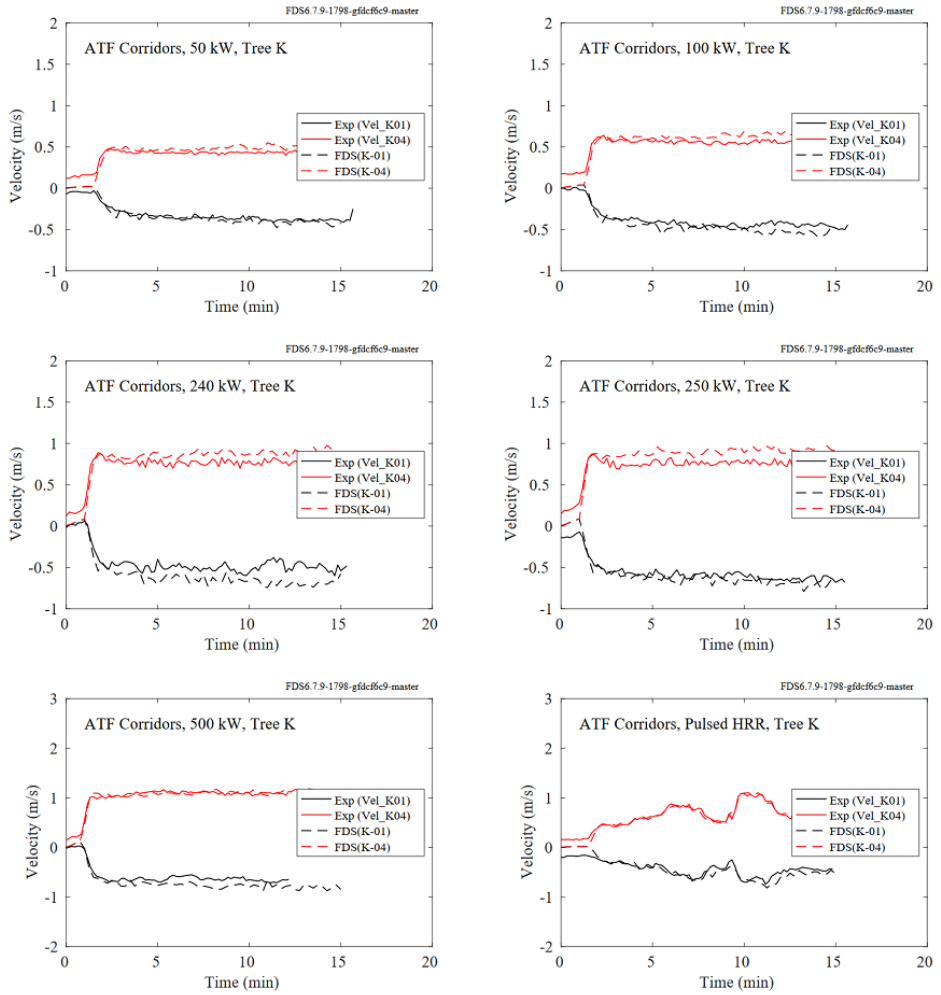

Рис. 32: ATF Коридоры, скорость газа, уровень 2, место K