

Специальное издание НИСТ 1019-5  
Руководство пользователя  
программы FDS (Версия 5)

Перевод: ООО «СИТИС»  
<http://www.fds-smv.ru>

# Специальное издание НИСТ 1019-5 Программа FDS (Версия 5)

## Руководство пользователя

Кэвин McGrattan  
Брайн Клейн  
Симо Хостикка  
Джейсон Флойд

В сотрудничестве с Техническим научно-  
исследовательским центром VTT

**NIST**

**National Institute of  
Standards and Technology**  
U.S. Department of Commerce

**Национальный институт стандартов и технологии**  
Министерство торговли США

# Специальное издание НИСТ 1019-5

## Руководство пользователя программы FDS (Версия 5)

Кэвин McGrattan  
*Лаборатория по пожарной безопасности НИСТ*

*Гейтерсберг, Мэриленд, США*

Симо Хостикка  
*Технический научно-исследовательский центр VTT Финляндии г. Эспо, Финляндия*

Джесон Флорид  
*Корпорация «Hughes Associates»*

*Балтимор, Мэриленд, США*

Сентябрь 2007



Руководитель Министерства торговли США  
Карлос М. Гутьеррес  
Национальный институт стандартов и технологии  
*Временно исполняющий обязанности директора Джеймс М. Тернер*

Для правильного описания технологии проведения испытаний или для общего представления в этом документе могут быть упомянуты некоторые коммерческие объекты, оборудование или материалы. Их упоминание не означает, что НИСТ рекомендует или одобряет их использование, или то, что данные объекты, материалы или оборудование являются наиболее доступными для реализации этой цели

**Национальный институт стандартов и технологии Специальное издание 1019-5,  
Специальное издание НИИСТ 1019-5, 186 страниц (Октябрь 2007)**

**Кодифицирован: NSPUE 2**

ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ТИПОГРАФИЯ США

ВАШИНГТОН: 2007

---

Руководитель отдела по документации,  
Правительственная типография США

Интернет: [bookstore.gpo.gov](http://bookstore.gpo.gov)

Тел: (202)512-1800

Факс: (202) 512-2250

Эл. почта: Stop SSOP, Washington, DC 20402-0001

## **Предисловие**

В данном руководстве содержится описание применения программы FDS версии 5. В нем не дается теория. В справочнике «Техническое руководство по применению FDS» [1] содержатся подробное описание основных уравнений и методов численного решения. В руководстве пользователя FDS частично присутствует информация по применению сопутствующей программы визуализации данных для FDS под названием Smokeview. Полностью ее функциональные возможности описаны в «Руководстве пользователя для Smokeview» 5 версии [2].

## **Отказ от ответственности**

Министерство торговли США не дает явных или косвенных гарантий пользователям программы FDS и не несет ответственность за ее использование. Согласно федеральному закону пользователи FDS единолично принимают на себя ответственность за: правомерность использования программы; за любые выводы, и за любые предпринятые или не предпринятые по результатам расчетов действия.

Пользователи предупреждены, что программа FDS предназначена для использования только компетентными специалистами в областях гидродинамики, термодинамики, физики горения и теплопередачи, и что программа является лишь инструментом для принятия решений квалифицированным пользователем. Программный пакет - это компьютерная модель, которая может иметь, а может не иметь прогностической способности применительно к конкретному ряду практических задач. Отсутствие точных прогнозов моделей может привести к ошибочным результатам в отношении пожарной безопасности. Все результаты должны быть оценены знающим человеком.

Информация об оборудовании или коммерческом программном обеспечении в этом документе не считается утвержденной НИСТ, также не означает, что эти программы лучше других подходят для определенных целей.

## Об авторах

**Кэвин McGраттан** - математик Научно-исследовательской лаборатории по пожарной безопасности НИИСТ. В 1987 году получил степень бакалавров в области науки на инженерном факультете и прикладной науки в Колумбийском университете, затем защитил докторскую степень в Курантском институте Ньюйоркского университета в 1991 году. В 1992 году он стал сотрудником НИСТ и с тех пор занимается разработкой модели пожара, главным образом, программы FDS.

**Симо Хостикка** - старший ученый-исследователь в Техническом центре исследования VTT в Финляндии. Он является главным разработчиком подмоделей излучения и твердой фазы в FDS.

**Джесон Флойд** - главный инженер корпорации «Hughes Associates» в Балтиморе в штате Мэриленд. В университете Мэриленд он получил ученую степень бакалавра и защитил докторскую степень по программе «Ядерная техника». После окончания университета он выиграл конкурс на должность исследователя в Национальном научно-исследовательском совете в Научно-исследовательской лаборатории по пожарной безопасности НИСТ, где разработал алгоритм горения для FDS. В настоящее время его финансирует НИСТ грантом 60NANB5D1205 программой «Исследование пожара» (15 USC 278f). Он является главным разработчиком многопараметровой смешанной фракции модели горения и логики управления в FDS.

**Брайан Клейн** - специалист по информационным технологиям в Научно-исследовательской лаборатории по пожарной безопасности НИСТ. До того как устроиться на работу в НИСТ он 5 лет проработал в корпорации «Western Fire Center», занимался разнообразными проектами, включая моделирование пожаров, программирование сбора данных и количественное измерение параметров пожара. В настоящее время он занимается разработкой FDS и пользовательской поддержкой наряду с экспериментальными проверочными работами.

## Благодарность

Программа FDS разрабатывалась почти 25 лет. Однако официально она была выпущена только в 2000 году. С первого ее выпуска выполнялись постоянные обновления, в большой степени основанные на замечаниях и предложениях от пользователей. Ниже приводится список тех, кто внес большой вклад в этот процесс.

В НИСТ благодарность Дэну Мадриковскому, Дагу Уолтону, Бобу Веттори, Дейву Струпу, Стиву Керберу и Нэльсону Бриннер, которые применяли FDS и Smokeview для расследования смертельных случаев при пожарах. В ходе этих исследований они получили ценную информацию о точности и возможности использования модели, сравнив проведенные масштабные измерения во время реконструкции картины пожара.

Обнаружив, что модели FDS могут использоваться для вероятностной оценки рисков ядерных установок, комиссия по ядерному регулированию США финансировала обслуживание и развитие FDS. Особая благодарность выражается специалистам NRC (Комиссия по ядерному регулированию США) Марку Салли и Джейсону Дрейсбах и специалисту SAIC (Международная корпорация прикладных исследований) Франциске Джоглару.

Общество инженеров по пожарной безопасности (SFPE) спонсирует учебный курс по использованию FDS и Smokeview. Специалисты Крис Вуд «ArupFire», Дейв Шеппард «Бюро по контролю продаж алкогольных напитков, табачных изделий и напитков и оружия» (ATF) и Даг Карпентер специалист науки возгорания и технологии совместно с Морганом Херли SFPE разработали материалы для курса.

Профессор Дэвид Макгилл колледжа Сенек, Онтария, Канада, руководил курсом дистанционного обучения по использованию FDS, а также поддерживал сайт, который обеспечивал необходимыми рекомендациями от пользователей.

Признательны Иану Томасу, Халиду Моунуддину и Яну Беннеттсу за их описание и предоставление данных для горения поддона с этанолом Профессору Иану Томасу Университета Виктории, который также провел небольшой курс по использованию FDS в Австралии. Его студенты провели некоторые испытательные работы.

Профессор Чарльз Флеишманн Кантерберийского Университета, Новая Зеландия также оказал ценную помощь при модернизации документации.

Профессор Джеймс Уайт младший корпорации “Western Fire Center” предоставил ценную информацию по усовершенствованию функциональности модели в области судебной науки.

Пол Харт «Swiss Re», Генди Правинрей Служба GAP и Лаборатории по технике безопасности - организация UL США предоставили рекомендации по движению капель воды на твердых предметах.

В заключение, на следующих страницах приводится список тех, кто добровольно уделил время и приложил усилия в «Эксплуатационных испытаниях» FDS и Smokeview в преддверии его официального выпуска. Их вклад неопределим, потому что нет никакого другого способа проверить все технические характеристики модели.



## Бета – тестеры программы FDS 5

Nick Agnew	Maunsell, Australia
Camille Azzi	Universities of Glasgow and Strathclyde, Scotland
Matthew Bilson	Maunsell, Australia
George Braga	Federal District Fire Department, Brazil
Keith Calder	Senex Reed Calder Engineering, Canada
Steven Chi Heng Lam	Hoare Lea Fire Engineering, UK
Doo Chan Choi	Rolf Jensen & Associates, Inc., USA
Marco Cigolini	Italferr spa, Italy
John Cutonilli	Hughes Associates, Inc., USA
Sylvain Desanghere	CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique), France
Montu L. Das	Gage-Babcock & Associates, USA and Canada
Franck Didieux	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), France
Johannes Dimyadi	AstraVision-Solutions, New Zealand
Bill Ferrante	Roosevelt Fire District, USA
Paul Fuss	NIST, USA
Andreas Gerndt	University of Louisiana, USA
Emanuele Gissi	Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Comando Prov. di Genova, Italy
Paul Hart	Swiss Re, GAP Services, USA
Hsiao, Li Kai (Gary)	Fire Bureau, Taipei, Taiwan
Hu Zhi-Xin	University of Maryland, USA
Илья Н. Каркин	SITIS Ltd., Russia
Карькин Илья Николаевич	ООО «Ситис», Россия
Susanne Kilian	hhpberlin, Fire Safety Engineers, Germany
Sung Chan Kim	School of Mechanical Engineering, Chung Ang University, Korea
Pierre-Louis Lamballais	Flashover-Backdraft, France
A. Leonardi	StIL (Studio di Ingegneria Leonardi), Italy
Davy Leroy	Arup Fire, UK
Jason Liu	Warrington Fire Research, Australia
Timothy Liu	Locke Carey Fire Consultants, UK
Dave McGill	Seneca College, Ontario, Canada
Ken Miller	Las Vegas Fire & Rescue, USA
Pete Muir	Safe Consulting, UK
Stephen Olenick	Combustion Science & Engineering, Inc., USA
Kristopher Overholt	University of Houston-Downtown, USA
PENG Wei	State Key Laboratory of Fire Science, China
Andrew Purchase	Maunsell, Australia
Christian Rogsch	University of Wuppertal, Germany
Michael Roth	RWDI, Canada
Ahmed Salem	Alexandria University, Egypt
Robert Schmidt	Combustion Science & Engineering, Inc., USA
Joe Skaggs	CASE Forensics, USA
Piotr Smardz	Ahearne Fire Engineering Consultants, Ireland
Jamie Stern-Gottfried	Arup Fire, UK
Boris Stock	BFT Cognos Gmb, Germany
Blair Stratton	Beca, New Zealand

# Содержание

Предисловие.....	4
Отказ от ответственности .....	6
Об авторах .....	7
Благодарность .....	8
Содержание .....	10
Запуск FDS .....	14
Глава 1 .....	15
Введение .....	15
1.1 Техническая характеристика FDS.....	15
1.2 Что нового в пятой версии FDS?.....	17
Глава 2 .....	19
Начало работы .....	19
2.1 Где взять FDS и Smokeview? .....	19
2.2 Аппаратные требования.....	19
2.3 Требования к операционной системе компьютера.....	20
Глава 3 .....	21
Запуск FDS .....	21
3.1 Запуск расчета FDS .....	21
3.2 Мониторинг процесса .....	24
Глава 4 .....	25
Пользовательская поддержка .....	25
4.1 Номер версии .....	25
4.2 Описание часто встречающихся ошибок .....	26
4.3 Пользовательские требования и выявление ошибок .....	27
Создание входного файла FDS.....	28
Глава 5 .....	29
Базовая структура входного файла .....	29
5.1 Наименование работы .....	29
5.2 Форматирование групп .....	29
5.3 Структура входного файла .....	30
Глава 6 .....	33
Установка граничных значений времени и пространства.....	33
6.1 Наименование расчета: группа HEAD (таблица 13.6).....	33
6.2. Время моделирования: группа TIME (таблица 13.24) .....	33
6.3. Вычислительные сетки: группа MESH (таблица 13.11) .....	34
6.4 Вспомогательные параметры: группа MISC (таблица 13.12) .....	40
6.5 Дополнительный вопрос: Нестандартные начальные условия: группа INIT (таблица 13.8).....	44
6.6 Дополнительный вопрос: Границы настроек: группа CLIP (таблица 13.2).....	45
Глава 7 .....	46
Построение модели .....	46
7.1 Создание препятствий: группа OBST (таблица 13.13) .....	46
7.2 Создание отверстий: группа HOLE (таблица 13.7) .....	48
7.3. Применение свойств поверхности: группа VENT (таблица 13.26) .....	49
Глава 8 .....	52
Граничные условия.....	52
8.1 Основы.....	52
8.2 Описание граничных поверхностей: Группа SURF (таблица 13.22).....	52
8.3 Эффекты, связанные с давлением: Группа ZONE (Таблица 13.26).....	58
8.4 Описание действительных материалов: Группа MATL .....	61

8.5	Функции, задаваемые пользователем: Группы RAMP и TABL.....	68
8.6	Цвета препятствий, вентиляционных отверстий, поверхностей и сеток.....	71
Глава 9	.....	74
	Модели горения и излучения .....	74
9.1	Модель доли в смеси: группа REAC .....	74
9.2	Дополнительные виды газа: группа SPEC .....	78
9.3	Горение с конечной скоростью .....	80
9.4	Перенос излучения: Группа RADl.....	81
Глава 10	.....	83
	Частицы и капли: группа PART .....	83
10.1	Базовые сведения.....	83
10.2	Контролирующие частицы и капли .....	84
10.3	Свойства частиц и капель .....	85
10.4	Особые типы частиц и капель .....	86
10.5	Цветные частицы и капли.....	87
10.6	Дополнительный вопрос: распыление топлива.....	88
10.7	Дополнительный вопрос: тушение водой (только для модели доли в смеси) .....	89
Глава 11	.....	90
	Устройства и логические схемы .....	90
11.1	Расположение и ориентация устройств: Группа DEVC (Таблица 13.4) .....	90
11.2	Выходные данные устройств.....	91
11.3	Специальные устройства и их характеристики: Группа PROP (Таблица 13.16).....	91
11.4	Основные логические схемы.....	96
11.5	Расширенные функции управления: Группа CTRL .....	99
Глава 12	.....	105
	Выходные данные.....	105
12.1	Параметры управления выходными данными: группа DUMP .....	105
12.2	Опции выхода .....	106
12.3	Специальные выходные величины .....	111
12.4	Извлечение чисел из выходных файлов данных .....	117
12.5	Сводка выходных величин .....	117
Глава 13	.....	120
	Список входных параметров в алфавитном порядке.....	120
13.1	BNDF (Параметры граничного файла).....	120
13.2	CLIP (Минимальные/максимальные ограничивающие параметры) .....	120
13.3	CTRL (Параметры функции управления) .....	121
13.4	DEVC (Параметры устройства).....	121
13.5	DUMP (Параметры выходных данных).....	122
13.6	HEAD (Параметры заголовка).....	123
13.7	HOLE (Параметры отверстия).....	124
13.8	INIT (Начальные условия) .....	124
13.9	ISOF (Параметры изоповерхности) .....	124
13.10	MATL (Свойства материала).....	125
13.11	MESH (Параметры сетки).....	126
13.12	MISC (Вспомогательные параметры).....	126
13.13	OBST (Параметры препятствия) .....	129
13.14	PART (Лагранжевы частицы/капли).....	130
13.15	PROF (Параметры профиля стены) .....	131
13.16	PROP (Свойства устройства).....	132
13.17	RADI (Параметры излучения).....	133
13.18	RAMP (Функция параметров RAMP).....	134
13.19	REAC (Параметры реакции).....	135

13.20 SLCF (Параметры послойного файла).....	137
13.21 SPEC (Параметры веществ).....	137
13.22 SURF (Свойства поверхности).....	138
13.23 TABL (Параметры таблицы).....	141
13.24 TIME (Параметры времени).....	141
13.25 TRNX, TRNY, TRNZ (Преобразования сетки).....	141
13.26 VENT (параметры вентиляционного отверстия).....	141
13.27 ZONE (Параметры зоны давления).....	142
Глава 14.....	143
Преобразование входных файлов более ранних версий в FDS 5.....	143
14.1 Параметры численного домена: GRID и PDIM.....	143
14.2 Препятствия, вентиляционные отверстия и отверстия: OBST, VENT, и HOLE.....	143
14.3 Параметры поверхности: SURF.....	143
14.4 Параметры реакции: REAC.....	144
14.5 Параметры устройств: SPRK, HEAT, THCP.....	144
Типовая выборка и верификация.....	146
Глава 15.....	147
Методы проверки адекватности модели.....	147
15.1 Сопоставление с аналитическими решениями.....	147
15.2 Термодинамика.....	149
15.3 Излучение.....	153
15.4 Процессы в твердой фазе.....	155
Глава 16.....	158
Проверка кода программы.....	158
Глава 17.....	161
Численные тесты.....	161
17.1 Предпосылки.....	161
17.2 Гидродинамика.....	161
17.3 Горение.....	163
17.4 Датчики.....	164
17.5 Капли и мелкие брызги.....	165
17.6 Общая функциональность.....	167
Глава 18.....	168
Материалы.....	168
18.1 Проверка свойств твердой фазы.....	168
18.2 Термопластик.....	169
Глава 19.....	173
Примеры пожаров.....	173
19.1 Предпосылки.....	173
Глава 20.....	178
Анализ чувствительности.....	178
20.1 Чувствительность сетки.....	179
20.2 Чувствительность параметров масштабного моделирования вихрей.....	180
20.3 Чувствительность параметров излучения.....	181
20.4 Чувствительность теплофизических свойств твердого топлива.....	182
20.5 Резюме.....	182
Работа с исходным кодом FDS.....	184
Глава 21.....	185
Компиляция FDS.....	185
21.1 Исходный код программы FDS.....	185
Глава 22.....	188
Форматы выходных файлов.....	188

22.2 Скорость выделения тепла и связанные с ней величины .....	189
22.3 Выходные данные об устройствах.....	189
22.4 Контрольные выходные данные .....	189
22.5 Данные о массе газа .....	190
22.6 Зависимость от состояния доли в смеси .....	190
22.7 Файлы слоя.....	190
22.8 Данные Plot3D.....	191
22.9 Граничные файлы .....	191
22.10 Данные о частицах.....	192
22.11 Файлы профилей.....	193
Список литературы.....	194
Алфавитный указатель.....	198

# **Часть I**

## **Запуск FDS**

# Глава 1

## Введение

Описанная в этом документе компьютерная Программа **FDS (Fire Dynamics Simulator)** реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. FDS численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. В техническом руководстве FDS [1] содержатся формулировка уравнений и численный алгоритм.

Smokeview - эта специальная программа визуализации, которая применяется для отображения результатов моделирования FDS. Подробное описание Smokeview вы можете найти в руководстве пользователя Smokeview 5 версии [2].

### 1.1 Техническая характеристика FDS

Первая версия FDS официально была выпущена в феврале 2000 года. На сегодняшний день приблизительно половина приложений модели служит для проектирования систем управления дымом и изучения активации спринклеров и детекторов. Другая половина служит для восстановления картины пожара в жилых и промышленных помещениях. Основной целью FDS на протяжении своего развития было решение прикладных задач пожаробезопасности и в тоже время обеспечение инструментом для изучения фундаментальных процессов при пожаре.

#### Гидродинамическая модель

FDS численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. Основным алгоритмом является определенная схема метода предиктора-корректора второго порядка точности по координатам и времени. Турбулентность выполняется с помощью модели Смагоринского «Масштабное моделирование вихрей» (LES). Прямое численное моделирование (DNS) можно выполнять, если лежащая в основе расчетная сетка достаточно точна. Масштабное моделирование вихрей – режим работы по умолчанию.

#### Модель горения

В большинстве случаев в FDS применяется одноступенчатая химическая реакция, результаты которого передаются через двухпараметрическую модель доли в смеси (mixture fraction model). «Доля в смеси» в данном смысле - это скалярная величина, которая предоставляет массовую долю одного или более компонентов газа в данной точке потока. По умолчанию рассчитываются два компонента смеси: массовая доля несгоревшего топлива и массовая доля сгоревшего топлива (т.е. продуктов сгорания). Двухступенчатая химическая реакция с трехпараметрическим разложением доли в смеси раскладывается на одноступенчатые реакции - окисление топлива до монооксида углерода и окисление монооксида до диоксида. Три компонента в данном случае - несгоревшее топливо, масса топлива, которая завершила первый шаг реакции и масса топлива, которая завершила второй шаг реакции. Массовая концентрация всех основных реагентов и продуктов может быть получена с помощью «соотношения состояния». И, наконец, можно использовать многошаговую реакцию с конечной скоростью протекания.

### **Перенос излучения**

Лучистый теплообмен включен в модель посредством решения уравнения переноса излучения для серого газа и, для некоторых ограниченных случаев, с использованием широкодиапазонной модели. Уравнение решается с помощью метода, аналогичного методу конечных объемов для конвективного переноса, соответственно отсюда и название «метод конечных объемов» (FVM). При использовании приблизительно 100 дискретных углов вычисления лучистого теплообмена занимает примерно 20 % общего времени загрузки центрального процессора, небольшой расход задан уровнем сложности лучистого теплообмена. Коэффициенты поглощения сажей и дымом вычислены с помощью узкополосной модели RADCAL. Капли жидкости могут поглощать и рассеивать тепловое излучение. Это крайне важно при использовании распыляющих спринклеров, но имеет значение и для других спринклеров. Коэффициенты поглощения и рассеивания основаны на теории Ми.

### **Геометрия**

FDS решает основные уравнения на прямоугольной сетке. Препятствия обязаны быть прямоугольными, чтобы удовлетворять сетке.

### **Составные сетки**

Этот термин используется для описания более чем одной прямоугольной сетки при вычислении. Несколько сеток стоит задавать, например, в случаях, когда вычислительный домен имеет неправильную форму и его сложно описать с помощью одной сетки.

### **Параллельная обработка данных**

Расчеты FDS можно запустить на нескольких компьютерах, используя интерфейс передачи сообщений (MPI). Подробную информацию вы можете найти в разделе 3.1.2.

### **Граничные условия**

На всех твердых поверхностях задаются тепловые граничные условия, плюс данные о горючести материала. Тепло- и массоперенос с поверхности и обратно рассчитывается с помощью эмпирических соотношений, хотя при выполнении прямого численного моделирования (DNS) можно вычислить передачу тепла и массы напрямую.



## 1.2 Что нового в пятой версии FDS?

FDS 5 отличается от предыдущих версии обработкой граничных условий и горением газовой фазы. Среди важных изменений следующие:

### **Многоступенчатые реакции горения**

В предыдущей версии FDS допускалась только одна реакция для газовой фазы. Теперь благодаря схеме многоступенчатой реакции могут быть описаны зона тушения, производство CO, различные другие явления. Самым важным развитием в модели горения является более точное вычисление скорости выделения теплоты и лучшее моделирование локального тушения огня.

### **Слой вещества**

В предыдущих версиях подразумевалось, что твердые тела состоят из одного однородного слоя. Теперь поверхности могут быть смоделированы набором слоев материалов, каждый из которых задается через новую группу MATL. Из-за этого изменения прежние входные файлы устаревают.

### **Формат командной строки**

FDS по-прежнему запускается из командной строки, но порядок запуска немного отличается от предыдущих версий. Для подробной информации смотрите раздел 3.

### **База данных**

Для описания параметров материалов и реакций в предыдущих версиях в FDS использовался отдельный файл «база данных». Этот файл больше не применяется, теперь все параметры должны быть заданы во входном файле.

### **Описание устройств**

Изменился метод описания устройств и датчиков (спринклеров, термодетекторов, термопар и т.д.). Для более подробной информации по определению устройств и их свойств смотрите главу 11.1. Любое устройство может быть использовано для управления запуском спринклера, создания/удаления вентиляционных отверстий и препятствий.

### **Спринклеры**

Внешние файлы спринклеров, которые применялись в предыдущих версиях, больше не используются. Вся информация о спринклерах и других устройствах, которые применяются при пожаре, должна быть представлена во входном файле. Теперь спринклеры определяются новым вышеуказанным методом описания устройств. Для более подробной информации смотрите главу 11.1.

### **Функции управления**

Новая группа входных параметров описывает функции, которые контролируют активацию спринклеров, создание/удаление вентиляционных отверстий и препятствий и использование кода (завершение или перезапуск расчетов). Для подробной информации смотрите главу 11.5.

### **Численная сетка**

В предыдущих версиях FDS для определения численной сетки и расчетного домена использовались отдельные группы входных параметров. Теперь эти две группы объединены в одну упрощенную группу MESH. Группы PDIM и GRID не должны больше использоваться во входном файле. Для более подробной информации смотрите главу 6.3.

### **Зоны давления**

В FDS можно выделять зоны в вычислительной области, чтобы задать фоновое давление, отличное от давления окружающей среды, учитывать утечки, кривую вентилятора и т.д. Более подробную информацию смотрите в главе 8.3.

### **Образование тяги и стратификация атмосферы**

Для того чтобы лучше описать стратифицированную атмосферу и движение воздуха в высоких зданиях при перепадах температуры внутри и снаружи, была выполнена модернизация.

### **Адиабатическая температура поверхности**

Чтобы облегчить использование выходных данных FDS в тепловых и технических моделях конечных элементов, была добавлена новая выходная величина. Для подробной информации смотрите главу 8.2.2.

### **Разработка, распространение и формальная поддержка пользователей**

Начиная с FDS 5 среда разработки открытого кода SourceForge.net используется для управления конфигурацией (архивирование кода, модификация трекинга, корректировка ошибок, поддержка пользователей и т.д.). Для подробной информации смотрите главу 2.1.

### **Руководство по верификации и валидации работы программы FDS**

Начиная с FDS 5 будет создаваться многотомный документ с отчетами по верификации и валидации работы программы FDS. Это улучшает качество обновлений FDS, поскольку стандартный тестовый комплекс теперь будет использоваться для проверки выходных данных FDS, чтобы выполненные изменения в исходной программе не снизили точность расчетов. Это также обеспечит пользователей стандартным набором данных для проверки своих установок FDS и для сравнения результатов, которые передаются обратно программой FDS на их систему опубликованных данных.

## Глава 2

### Начало работы

FDS - это компьютерная программа, моделирующая процесс пожара. Программа, написанная на Fortran, считывает входные параметры из текстового файла, численно решает систему основных уравнений и записывает определенные пользователем выходные данные в файлы.

Smokeview - сопутствующая программа, которая отображает выходные файлы FDS в графическом формате. В Smokeview имеется графический интерфейс, в FDS его нет, однако существуют сторонние программы с графическим интерфейсом, которые создают текстовые файлы с входными параметрами, необходимыми для FDS.

В данном руководстве описано, где взять FDS и Smokeview и как использовать FDS. В отдельном документе описывается применение Smokeview [2]. Другие инструменты для FDS и Smokeview вы можете найти на веб-сайте.

#### 2.1 Где взять FDS и Smokeview?

Дополнительную информацию по загрузке исполняемых файлов, руководствам, исходным программам и системным программам, вы можете найти на сайте FDS-SMV <http://fire.nist.net/fds>. Обычно FDS/Smokeview распространяется инсталляционным пакетом или сжатым архивом, которые доступны для MS Windows, MacOSX, и Linux. О других операционных системах вы можете узнать на сайте.

Если вы хотите сохранить предыдущую версию FDS и Smokeview, скопируйте инсталляционный пакет в любое место, тогда во время обновления он не перезапишется.

#### 2.2 Аппаратные требования

Для эффективной работы в FDS требуется высокоскоростной центральный процессор и достаточный объем оперативной памяти. При минимальных технических требованиях система должна иметь 1 ГГц ЦПУ и, по крайней мере, 512 Мб оперативной памяти. Скорость центрального процессора определяет продолжительность вычисления, в то время как объем оперативной памяти определяет количество ячеек сетки, которое может быть сохранено в памяти. Большой жесткий диск необходим для сохранения результатов вычислений. Нередко один расчет занимает более гигабайта на жестком диске.

Большинство приобретенных за последние несколько лет компьютеров подходят для работы Smokeview, с условием, что оперативной памяти не меньше 512 Мб. Таким образом, компьютер может отображать результаты на диск без «свопинга». При использовании Smokeview также важно иметь видеокарту на ПК, который используется для отображения результатов вычислений FDS.

Для параллельных вычислений, версия MPI (Интерфейс передачи сообщений) FDS будет работать через стандартную сеть 100 Мбит/с. В сети 1 Гбит или 1000 Мбит/с уменьшается время ожидания и улучшается передача данных между узлами.

## **2.3 Требования к операционной системе компьютера**

FDS и Smokeview сделаны общедоступными для того, чтобы практикующие инженеры по пожарной безопасности могли выполнить моделирование пожара на современном уровне и при умеренных затратах. Поэтому FDS и Smokeview разработаны для компьютеров, которые поддерживают Microsoft Windows, MacOSX, и различные версии Unix/Linux.

### **MS Windows**

Необходим инсталляционный пакет для операционной системы Windows. Не рекомендуется использовать FDS/Smokeview под версией MS Windows, предшествующие версии Windows 2000.

### **Mac OS X**

Zip-архив X Mac OS X Tiger FDS доступен для обеих архитектур PowerPC и Intel. Рекомендуется использовать версии OSX10.4.x или выше; версии, предшествующие 10.4x официально не поддерживаются. Пользователи всегда могут загрузить последнюю версию оригинала и скомпилировать FDS для других версии OSX (Подробности смотрите в приложение 21).

### **Unix, Linux**

Пользователи Unix, Linux могут установить FDS и Smokeview, загрузив соответствующие предварительно скомпилированные исполняемые файлы и установив их в любом месте, где посчитают нужным. Если предварительно скомпилированный исполняемый файл не работает (обычно это происходит из-за несовместимости библиотек) исходный код FDS может быть загружен и скомпилирован при помощи Fortran 90 и Ccompiler (для подробной информации смотрите приложение 21). Если Smokeview не работает на рабочей станции Linux или Unix, для просмотра выходных данных FDS вам нужно использовать Windows или Mac PC.

### **Параллельные вычисления в FDS**

Если вы хотите использовать FDS для параллельных вычислений, на каждом компьютере в сети должен быть установлен интерфейс передачи сообщений. Сведения об установке интерфейса передачи сообщений на разных компьютерных программах даются на Web-сайте FDS. Для более подробной информации смотрите на сайте раздел «Разработка».

## Глава 3

### Запуск FDS

В этой главе описывается процедура запуска расчетов FDS.

Любого расчета FDS необходим для входной файл. Создание входных файлов подробно описано во II части. Если вы плохо знакомы с FDS и Smokeview, настоятельно рекомендуем начать с имеющегося входного файла, запускать его как есть, а затем изменять в соответствии с расчетным сценарием. Образцы входных файлов содержатся в стандартном установочном пакете. Используя образцы, вы познакомитесь с процедурой запуска, научитесь пользоваться Smokeview и убедитесь, что ваш компьютер готов к выполнению задач.

#### 3.1 Запуск расчета FDS

FDS может быть запущен из командной строки или сторонним графическим интерфейсом пользователя (GUI). В последующем обсуждении предполагается, что FDS запускается из командной строки. FDS может быть запущен на одном компьютере с использованием одного ЦПУ или на нескольких компьютерах с несколькими процессами. Для любой операционной системы существует два исполняемых файла. Однопроцессорный исполняемый файл для Windows называется **fds#.exe**. Исполняемый файл для параллельных вычислений называется **fds#\_mpi.exe**. В названии файла буквы “mpi” обозначают «Интерфейс передачи сообщений».

Обратите внимание на то, что входной файл для обеих версии одинаковый. На самом деле перед запуском параллельного расчета вам стоит запустить входной файл в обычном режиме, чтобы убедиться в его правильном написании.

##### 3.1.1 Запуск расчета FDS (Однопроцессорная версия)

Перед тем, как писать входной файл, начинающим пользователям рекомендуется запустить файл из примера. Предполагается, что входной файл с названием **job\_name.fds** находится в отдельной папке. Запустить программу можно в командной строке DOS или Unix следующим образом:

##### MS Windows

Откройте окно командной строки и выберите папку (“cd”) в которой находится нужный входной файл, затем запустите код, напечатав в командной строке:

```
fds5 job_name.fds
```

Символьная строка **job\_name** во входном файле обычно обозначается как **CHID**. Рекомендуется называть входной файл и **CHID** одинаково, чтобы все файлы одного расчета имели одно название. Процесс моделирования отображается с помощью выходной диагностики, которая выводится на экран. Подробные диагностические данные автоматически записываются в файл **CHID.out**, где **CHID** является символьной строкой, обычно такой же, как **job\_name**, обозначенной во входном файле. Вывод данных на экран может быть переадресован в файл через альтернативную команду.

```
fds5 job_name.fds > job_name.err
```

##### Mac OS X, Unix, Linux

В зависимости от типа установки вам нужно установить разные пути или переменные среды, для того чтобы запускать FDS, не прописывая полный путь к исполняемому файлу.

Простейший способ - «псевдоним» в вашей оболочке запускаемого скрипта. В ниже приведенном примере предполагается, что `fds5` соответствует своему полному пути. Для того, чтобы сделать файл исполняемым, вам может понадобиться «`chmod+x`». Сделав это, запустите FDS, набрав в командной строке следующее:

```
fds5 job_name.fds
```

входные параметры считываются из файла `job_name.fds`, а сообщения об ошибке и другие неисправности отображаются на экране. Для того чтобы запустить программу в фоновом режиме необходимо:

```
fds5 job_name.fds >& job_name.err &
```

Обратите внимание, что во втором случае вывод данных на экран сохранился в файле `job_name.err`, а подробная диагностика автоматически сохранится в файле `CHID.out`, где **CHID** - это символьная строка обычно такая же, как `job_name`, задаваемая во входном файле. Программы лучше запускать в фоновом режиме, чтобы не занимать консоль.

### ***3.1.2 Запуск расчета FDS (Многопроцессорная версия)***

Запуск FDS через сеть с помощью многопроцессорной версии и многоблочной памяти несколько сложнее, чем запуск однопроцессорной версии. От пользователя потребуется больше усилий по обеспечению бесперебойного соединения между устройствами. Это подразумевает создание учетной записи для конкретного пользователя на каждом устройстве, совместное использование каталогов, увеличение скорости сети, порядок взаимодействия устройств между собой и т.д. Некоторые из этих задач выполняются программным обеспечением для параллельной обработки данных, другие нет. Безусловно, в последующие годы процесс будет упрощен, но в настоящее время параллельная обработка данных все еще является относительно новым разделом и требует больше опыта и знаний в плане понимания как операционной системы, так и сетевого подключения компьютеров.

Для того чтобы несколько компьютеров могли выполнять единый расчет, применяется интерфейс передачи сообщений [3]. Фактически, расчет должен быть разделен на несколько частей, для работы с каждой из которых назначается отдельный процессор. Каждый процессор управляет работой FDS в своей конкретной части, а Интерфейс передачи сообщений регулирует передачу данных между ними. Существуют разные методы применения интерфейса передачи сообщений подобно разным компиляторам Fortran и C. Практически, каждое из них - это библиотечная подпрограмма, вызываемая FDS, которая передает данные с одного потока в другой через сеть. Этот формат вызова подпрограммы широко распространен, он предоставляет возможность различным поставщикам и организациям свободу в разработке компьютерных программ, когда речь идет об открытом коде.

Способ параллельного запуска FDS зависит от версии установленного MPI. В настоящее время в НИИСТ параллельная версия MPI запускается на Windows PCs, которая соединена локальной сетью (локальная сеть, 100 Мбит/с) или на кластере Linux PCs, соединенный специальной скоростной сетью. Для Windows применяют MPICH2, бесплатную версию интерфейса передачи сообщений Аргоннской национальной лаборатории США.

### **MPICH2**

Параллельные вычисления в FDS могут быть выполнены с помощью MPICH2 как в командной строке, так и графическим интерфейсом пользователя (GUI). После того как библиотеки MPICH2 установлены на каждом компьютере и необходимые каталоги

открыты для общего доступа, FDS запускается с помощью команды с одного из компьютеров

```
mpirun -file config.txt
```

Здесь **config.txt** - это текстовый файл, который содержит название и путь к исполняемому файлу FDS, название входного файла FDS, рабочие каталоги и названия компьютеров, на которых запускают программу. Например, файл **config.txt** для запуска программы в НИСТ с помощью компьютеров `fire_1`, `fire_2`, and `fire_3`, мог выглядеть следующим образом:

```
exe \\fire_1.nist.gov\NIST\FDS\fds5_mpi.exe job_name.fds
dir \\fire_1.nist.gov\Projects\
hosts
fire_1.nist.gov 2
fire_2.nist.gov 1
fire_3.nist.gov 2
```

Числа, следующие за «host» представляют число потоков для запуска на определенной машине. В данном примере 5 потоков запускаются для вычисления FDS, которые имеют 5 сети. Каталоги `exe` and `dir` должны иметь право доступа на запись и чтение.

Все компьютеры должны иметь доступ к исполняемому файлу и рабочему каталогу `fire_1`. В Windows это выполняется с помощью функции «общий доступ». Под Unix/Linux и OSX, в процессе задействуется перекрестное соединение файловых систем разных машин.

### LAM-MPI

На кластере Linux в Научно-исследовательской лаборатории по пожарной безопасности при НИСТ Индийским университетом<sup>1</sup> была запущена LAM-MPI. С помощью LAM/MPI, предварительно соединенные компьютеры конкретной функцией FDS будут использоваться отдельной командой, которая называется “`lamboot`.” В этом случае FDS запускается командой:

```
mpirun -np 5 fds5_mpi job_name.fds
```

где символ 5 обозначает, что используется 5 процессоров. В этом случае, исполняемый файл **fds5\_mpi** расположен в рабочем каталоге. Для запуска процесса в фоновом режиме:

```
mpirun -np 5 fds5_mpi job_name.fds >& job_name.err &
```

В файле **job\_name.err** содержится то, что обычно выводится на экран.

Обратите внимание, что существуют разные версии MPI, некоторые из них бесплатные, другие нет. FDS была разработана для работы с любыми известными версиями без особого вмешательства пользователя. Тем не менее, помните, что параллельная обработка данных - это относительно новая область информатики и в будущем все изменится.

<sup>1</sup> [http:// www.lam-mpi](http://www.lam-mpi)

### 3.2 Мониторинг процесса

В файл, который называется **CHID.out**, записывается диагностика расчета. Здесь также записаны загрузка центрального процессора и время моделирования, таким образом, вы можете узнать время работы программы. Smokeview можно запустить в любой момент, и проверить функционирование визуально. Чтобы остановить вычисление до истечения времени, выполните одно из двух действий: прервите процесс или, что более желательно, создайте в каталоге, где находятся выходные файлы, файл **CHID.stop**. Наличие такого файла корректно останавливает расчет и выводит последние данные для просмотра в Smokeview.

Поскольку вычисления могут длиться несколько часов или дней, в FDS есть функция перезапуска. Подробности о применении такой функции даются в главе 6.4.1. Если кратко - в начале вычисления нужно определить, как часто должен сохраняться файл «Restart». Если что-то прервет вычисление, например отключение электричества, вычисление может быть возобновлено с того момента, когда был сохранен последний файл для перезапуска.

Можно также контролировать время останова и вывод файлов перезапуска с помощью функций управления, которые описаны в главе 11.5.



## Глава 4

### Пользовательская поддержка

Нередко во время запуска расчета мы сталкиваемся с разными проблемами, одни связаны с FDS, а другие с компьютером. FDS – не типичная прикладная программа ПК. Это важный расчет, который максимально использует все возможности процессора и памяти компьютера. На самом деле в FDS не существует жестко установленных ограничений, которые не дали бы вам запустить слишком тяжелый для вашего компьютера расчет. При том, даже если вашему компьютеру достаточно оперативной памяти, выполнение некоторых расчетов может занять недели или месяцы. В начале моделирования сложно предсказать, сколько потребуется времени и памяти. Научитесь контролировать использование ресурсов вашего компьютера. Начните с маленьких расчетов и постепенно переходите к большим.

Хотя многие функции в FDS достаточно развиты, многие еще требуют доработки. FDS применяется в практических инженерных приложениях, а также для исследования пожаров и физики горения. Фактически, одной из самых сложных задач в применении программы является моделирование пожара в комнате, обставленной обычной мебелью. Поэтому будьте терпеливы и учитесь разбивать сценарий на составные части. Например, не пытайтесь моделировать распространение пожара по всему этажу здания, если вы не моделировали горение разных горючих материалов в небольших расчетах. Примеры, описанные в части III, помогут вам разработать большие, сложные модели из небольших стандартных блоков.

Помимо руководства пользователя FDS в Интернете есть дополнительные ресурсы. К ним относятся: «Issue tracker», который позволит вам сообщать об ошибках, отправлять запросы о расширении возможностей и задавать уточняющие вопросы, и форум «Group Discussions», на котором рассматриваются общие проблемы работы с программой, а не конкретные ошибки. Перед применением этих онлайн ресурсов стоит сначала попробовать самим решить проблемы, выполняя простые тестовые расчеты или устраняя ошибки во входном файле. В следующих разделах приведен список сообщений об ошибках и советы по решению проблем.

#### 4.1 Номер версии

Если в FDS произошли неожиданные сбои, вам необходимо не только описать суть проблемы, но и сообщить номер версии FDS. Каждый релиз программы FDS имеет номер версии, например 5.2.6, где первая цифра обозначает *главную версию*, второй – *второстепенную версию*, и третий – *отладочную версию*. Главные версии выпускаются раз в несколько лет и, как видно из названия, подразумевают существенное изменение в функциональных возможностях модели. Второстепенные версии выпускаются раз в несколько месяцев, и могут включать незначительные изменения функциональных возможностей. Информация по версии может помочь вам решить, повлияют ли изменения на выполняемые вами виды работ. Отладочные версии - это только исправление ошибок, они не затрагивают функциональные возможности программы. Для того чтобы узнать номер версии просто наберите исполняемый файл в командной строке:

```
fds5
```

и необходимая информация появится вместе с датой компиляции (необходимой вам) и так называемым SVN - номером (необходимым нам). SVN - номер обозначает номер репозитория подверсии исходной программы (Subversion repository number). Это позволит

нам вернуться назад и восстановить верные файлы исходной программы, которые были использованы при создании этого исполняемого файла.

Возьмите себе за правило проверять номер версии исполняемого файла, периодически проверять новые выпуски, в которых возможно уже найдено решение вашей проблемы, и, сообщая о проблеме, информировать нас о том, какой версией вы пользуетесь.

## 4.2 Описание часто встречающихся ошибок

Расчет FDS может завершиться до того, как пользователь установил временной предел. Ниже дается список сообщений об общих сбоях и методах их выявления:

**Ошибки во входном файле:** Большинство часто встречающихся ошибок в FDS происходят из-за неправильного ввода операторов. Результат таких ошибок – немедленное завершение программы и вывод сообщения, например: «Ошибка: Сбой в строке HEAD» (“ERROR: Problem with the HEAD line”). При таких ошибках, проверьте строку во входном файле, которая указана в сообщении об ошибке. Убедитесь, что названия параметров записаны правильно, заглавными буквами. Убедитесь что в конце каждой строки поставлен / (прямой слэш). Убедитесь, что для каждого параметра используется верный тип данных, например, одно действительное число или несколько целых чисел и.т.п. Убедитесь, что нет символов, несоответствующих коду ASCII (Американский стандартный код для обмена информацией), так как это иногда происходит при копировании текста из другой программы или программного средства обработки текстов. Убедитесь что ноль написана цифрой, а O - это буква O, что цифра 1 - не знак «!», что строки символов заключены в апострофы. Убедитесь, что текстовый файл в системе Unix/Linux не был создан в системе ДОС или наоборот. Удостоверьтесь, что все перечисленные параметры все еще используются, так как часто новые версии FDS опускают или меняют параметры и заставляют пересмотреть прежние входные файлы.

**Ошибки при неустойчивости численного решения:** Во время расчета возможна ситуация, когда скорость потока в некоторых ячейках домена из-за численных ошибок возрастает, заставляя программу уменьшать шаг по времени до тех пор, пока логика в коде не решит, что результат нефизичен, и не остановит расчет, записав сообщение об ошибке в файле **CHID.out**. В этих случаях расчет завершается, создается последний файл Plot3D, предоставляя пользователям возможность обнаружить, в каком месте в расчетном домене произошла ошибка. Обычно неустойчивость численного решения можно определить по ложным большим векторами скорости в небольшой зоне внутри домена. Часто причиной такой неустойчивости являются сетки, соотношение размеров ячеек которых больше чем 2 к 1, высокая скорость потока через небольшое отверстие, резкие изменения тепловой мощности или другие резкие изменения в поле течения. В зависимости от ситуации существуют разные способы решения этих проблем. Попробуйте выявить проблему перед тем, как сообщать о ней. Создателю входного файла гораздо проще выявить проблему, чем кому бы то ни было.

**Нехватка вычислительных ресурсов.** Для выполнения расчета может потребоваться больше оперативной памяти, чем есть у компьютера, или выходные файлы могут израсходовать весь доступный объем диска. В этих случаях, компьютер может вывести, а может не вывести вразумительное сообщение об ошибке. Иногда компьютер просто не реагирует. Ответственность за обеспечение компьютера памятью необходимой для выполнения расчета лежит на пользователе. Помните, что нет ограничений по объему или длительности расчетов FDS, это зависит от вычислительных ресурсов. При любом новом моделировании попробуйте сначала выполнить расчет на грубой сетке, а затем постепенно уменьшайте ее до тех пор,

пока компьютер уже не сможет справиться с этой задачей. Затем вернитесь к размеру сетки, при которой компьютер мог выполнить задание. Не пытайтесь выполнить расчет, используя от 90% до 100% компьютерной памяти. Это рискованно. По отзывам пользователей, для стандартного Windows ПК с памятью 4Гб для расчета FDS используется только 2 Гб.

**Ошибки при выполнении программы:** Ошибки происходят как в операционной системе компьютера, так и в программе FDS. Сообщение об ошибке выводится на экран или в выходной файл. Многим людям, даже программистам, эта ошибка непонятна, хотя иногда кто-то находит маленький ключ к разгадке, если упоминается конкретная неполадка как, например: «переполнение стека», «деление на нуль» или «файл пишет ошибку, устройство=...». Эти ошибки могут быть вызваны сбоем в программе FDS, например, если число делится на нуль или массив был использован до того, как его определили, или рядом других ошибок. Перед тем как передать ошибку в SourceForge Support Tracker, постарайтесь систематически упростить входной файл до исчезновения ошибки. Обычно этот процесс позволяет выявить параметры расчета, которые приводят к сбоям, и помогает в их устранении.

**Пуассоновская инициализация:** Иногда в самом начале расчета возникает ошибка, указывающая на что в «Пуассоновской инициализации» произошел сбой. В FDS используется уравнение давления, известное как «уравнение Пуассона». Пуассоновский решатель состоит из большой системы линейных уравнений, которая должна быть инициализирована при запуске расчета. Очень часто ошибка, произошедшая при инициализации, связана с размером сетки, которая меньше чем 4 (за исключением двумерного расчета). Возможно, также в координатах вычислительного домена что-то в корне неправильное. Выявите ошибку, проверив линии MESH во входном файле.

### 4.3 Пользовательские требования и выявление ошибок

Так как FDS постоянно совершенствуется, часто возникают сбои, связанные с разными подпрограммами и функциями. Разработчикам нужно знать, если определенная функция не работает, и они заинтересованы в сообщениях о происходящих сбоях. Однако сбой должен быть точно определен. Самый лучший способ определить его - максимально упростить входной файл, чтобы можно было выявить ошибку. Также ограничьтесь сообщениями об ошибках в тех функциях, которые явно не работают. Физические проблемы, такие как пожар, который не воспламеняется, пламя, которое не распространяется и т.д. - могут быть связаны с разрешающей способностью сетки или формулировкой сценария, и перед тем как сообщить о них, пользователь должен как следует их изучить. Если сообщение об ошибке в операционной системе, а не в FDS, сначала исследуйте явные причины, такие как: емкость памяти, объем диска и т.д.

Если это не решит проблему, подробно сообщите об ошибке и связанных с ней последствиях. Входной файл должен быть упрощен максимально, для того чтобы ошибка проявилась в начале расчета. В случае необходимости приложите упрощенный входной файл, следуя инструкции на web-сайте. Так разработчики смогут быстро запустить входной файл, в котором произошел сбой, и выявить его.

Внимание: Сообщения о конкретных сбоях, запросы о функциональности и улучшениях должны быть отправлены в «Issue Tracker», но не в дискуссионную группу.
---

## **Часть II**

### **Создание входного файла FDS**

## Глава 5

### Базовая структура входного файла

#### 5.1 Наименование работы

Работа FDS основана на однократном вводе текстового файла<sup>1</sup>, содержащего параметры, которые организованы в группы<sup>2</sup>. Входной файл обеспечивает FDS всей необходимой информацией для описания сценария. Входной файл сохраняется с именем вида **job\_name.fds**, где **job\_name** является произвольной последовательностью символов, позволяющей идентифицировать расчет. Если та же самая последовательность символов повторяется в группе HEAD внутри входного файла, то и все выходные файлы в расчете будут иметь это общее имя.

В названии работы не должно быть пробелов. Вместо них используйте символ подчеркивания. Символы подчеркивания вместо пробела также относятся к обычной практике названия директорий.

Не забывайте, что FDS просто переписет выходные файлы, если задано то же имя. Это удобно при модификации входного файла, так как помогает экономить место на диске. Просто будьте осторожны, чтобы не переписать расчеты, которые вы хотите сохранить.

#### 5.2 Форматирование групп

Параметры во входном файле распределены по группам. Каждая группа начинается со знака амперсанда &, за которым сразу следует название группы, затем список входных параметров, разделенных запятыми и в конце прямой слэш. Например, строка

```
&DUMP NFRAMES=1800, DT_HRR=10., DT_DEVC=10., DT_PROF=30. /
```

задает значения различных параметров, содержащихся в группе DUMP. Значения этих параметров объясняются в последующих главах. Параметры одной группы можно записывать в несколько строк, но обязательно нужно поставить «/» в конце записи, иначе данные не будут распознаны. Не записывайте между знаками «&» и «/» ничего кроме параметров и значений этих параметров. В противном случае FDS остановится сразу после запуска.

Параметры внутри группы могут быть разделены запятыми, пробелами, разрывом строки. Очень удобно использовать запятые или разрывы строк. Некоторые машины не распознают пробелы. В файл можно вписать комментарии или заметки при условии, что непосредственно перед «&» нет ничего кроме пробела, и ничего не стоит между амперсандом (&) и слэшем (/), кроме нужных параметров, соответствующих данной группе списка имен.

Параметры входного файла могут быть целыми числами (T\_END=5400), действительными числами (CO\_YIELD=0.008), группами действительных и целых чисел (XYZ=6.04,0.28,3.65) или (IJK=90,36,38), символьными строками (CHID='WTC\_05\_v5'), группами символьных строк (SURF\_IDS='burner','INERT','INERT'), или логическими параметрами (POROUS\_FLOOR=.FALSE).

Логический параметр может иметь значение либо .TRUE., либо .FALSE., где точки являются условными обозначениями FORTRAN. Символьные строки должны

---

<sup>1</sup> ASCII – American Standard Code for Information Interchange

<sup>2</sup> Группа – это входная запись Fortran

записываться в точности, как в руководстве: код восприимчив к регистру, и знаки подчеркивания имеют значение.

Большинство входных параметров – это действительные или целые скалярные величины, например,  $DT=0.02$ , но иногда входные данные представляют собой многомерные массивы. Например, при описании твердой поверхности вам необходимо выразить массовые доли разнородных материалов, из которых состоят слои. Входной массив `MATL_MASS_FRACTION (IL,IC)` предназначен для задания массовой доли компонента `IC` слоя `IL`. Например, если массовая доля второго материала третьего слоя 0.5, то пишем:

```
MATL_MASS_FRACTION(3,2)=0.5
```

Чтобы ввести более одной массовой доли, делается запись типа:

```
MATL_MASS_FRACTION(1,1:3)=0.5,0.4,0.1
```

которая означает, что первые три материала слоя 1 имеют массовые доли 0,5, 0,4 и 0,1 соответственно. Запись 1:3 означает элементы массива 1-3 включительно.

Имейте в виду, что символьные строки могут быть заключены либо в апострофы, либо в вопросительные знаки. Не создавайте файл, просто скопировав текст откуда-нибудь, кроме простого текстового редактора. В противном случае знаки пунктуации могут быть некорректно переданы в текстовый файл.

### 5.3 Структура входного файла

Вообще группы параметров могут быть записаны во входной файл в любом порядке, но лучше всего организовать их систематически. Обычно общая информация перечислена ближе к началу входного файла, а подробная информация, такая как препятствия, устройства и т.д. приводится ниже. FDS сканирует весь входной файл каждый раз, когда обрабатывает определенную группу списка имен. При работе с некоторыми текстовыми редакторами было замечено, что последняя строка файла часто не читается FDS из-за отсутствия знака «конец файла». Чтобы FDS прочитала весь входной файл, добавьте

```
&TAIL/
```

в качестве последней строки в конце входного файла. Это позволяет сделать файл цельным от `&HEAD` до `&TAIL`.

Другое практическое правило при написании входных файлов заключается в добавлении только тех параметров, значение которых должно отличаться от их значения по умолчанию. В этом случае вам будет легче различить, что нужно вам и что необходимо FDS. Комментарии можно добавлять в любом количестве, при условии, что они не попадают в группу параметров.

Общая структура входного файла приведена ниже. Многие строки исходного входного файла<sup>3</sup> удалены для простоты восприятия.

```
&HEAD CHID='WTC_05_v5', TITLE='WTC Phase 1, Test 5, FDS version 5' /
&MESH IJK=90,36,38, XB=-1.0,8.0,-1.8,1.8,0.0,3.82 /
&TIME T_END=5400. /
&MISC SURF_DEFAULT='MARINITE BOARD', TMPA=20., POROUS_FLOOR= .FALSE. /

&DUMP NFRAMES=1800, DT_HRR=10., DT_DEVC=10., DT_PROF=30. /

&REAC
```

<sup>3</sup> Существующий входной файл `WTC_05_v5.fds` является частью «комплекса проверки правильности FDS».

```

ID = 'HEPTANE TO CO2'

FYI = 'Heptane, C_7 H_16'

C =7.

H = 16.

CO_YIELD = 0.008

SOOT_YIELD = 0.015 /

&OBST XB= 3.5, 4.5,-1.0, 1.0, 0.0, 0.0, SURF_ID='STEEL FLANGE' / Fire Pan...
&SURF ID = 'STEEL FLANGE'
COLOR = 'BLACK'
MATL_ID = 'STEEL'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.0063 /
...&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /...

&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /...

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' /...

&DEVC XYZ=6.04,0.28,3.65, QUANTITY='oxygen', ID='EO2_FDS' /...

&TAIL / End of file.

```

Когда вы присыпаете к разработке нового сценария, прежде всего настоятельно рекомендуется выбрать существующий входной файл, который соответствует вашему случаю, внести необходимые изменения, затем запустить расчет при низком разрешении сетки, чтобы определить, правильно ли настроена геометрия. Лучше всего начать с относительно простого файла, охватывающего основные особенности проблемы, не увязая во множестве подробностей, которые могут скрыть существенную ошибку в вычислениях. Первые расчеты нужно разбивать на ячейки таким образом, чтобы время расчета не превышало часа, и можно было легко внести исправления, не тратя много времени. Пока вы учитесь писать входные файлы, вам придется постоянно запускать и перезапускать модель после каждого усложнения.

В таблице 5.1 представлен список всех групп параметров, а также указано, где можно найти ссылку на описание данной группы и таблицу со всеми ключевыми словами к каждой группе.

### 5.1 Справочная таблица групп параметров

Group Name Название группы	Namelist Group Description Описание группы параметров	Reference Section Справочный раздел	Parameter Table Таблица параметров
BNDF	Boundary File Output Выходной файл, значение на поверхности твердых тел	12.2.6	13.1
CTRL	Control Function Parameters Параметры функции управления	11.5	13.3
DEVC	Device Parameters Параметры устройства	11.1	13.4
DUMP	Output Parameters Параметры вывода	12.1	13.5
HEAD	Input File Header Заголовок входного файла	6.1	13.6
HOLE	Obstruction Cutout Отверстие	7.2	13.7
INIT	Initial Condition Начальное условие	6.5	13.8
ISOF	Isosurface File Output Вывод файла изоповерхности	12.2.7	13.9
MATL	Material Property Свойство материала	8.4	13.10
MESH	Mesh Parameters Параметры сетки	6.3	13.11
MISC	Miscellaneous Вспомогательные параметры	6.4	13.12
OBST	Obstruction Препятствие	7.1	13.13
PART	Lagrangian Particle Лагранжева частица	10	13.14
PROF	Profile Output Вывод профиля	12.2.4	13.15
PROP	Device Property Свойства устройства	11.3	13.16
RADI	Radiation Излучение	9.4	13.17
RAMP	Ramp Profile Линейная характеристика	8.5	13.18
REAC	Reactions Реакции	9.1	13.19
SLCF	Slice File Output Выходной файл, значения параметров в плоскости	12.2.5	13.20
SPEC	Species Parameters Параметры видов веществ	9.2	13.21
SURF	Surface Properties Свойства поверхности	8.2	13.22
TIME	Simulation Time Время моделирования	6.2	13.24
TRNX	Mesh Stretching Растяжение сетки	6.3.3	13.25
VENT	Vent Parameters Параметры вентиляционного отверстия	7.3	13.26
ZONE	Pressure Zone Parameters Параметры зоны давления	8.3	13.27



## Глава 6

### Установка граничных значений времени и пространства

#### 6.1 Наименование расчета: группа HEAD (таблица 13.6)

Первое, что нужно сделать при подготовке входного файла – присвоить расчету имя. Часто в работе требуется рассчитать несколько сценариев, и тогда правильный выбор имен может помочь упорядочить работу. Группа HEAD содержит два параметра, как в этом примере:

```
&HEAD CHID='WTC_05_v5', TITLE='WTC Phase 1, Test 5, FDS version 5' /
```

CHID – строка не больше 30 символов, используемая для пометки выходных файлов. Если, например, CHID='WTC\_05\_v5', удобно называть файл входных данных WTC\_05\_v5.fds, чтобы входной файл можно было ассоциировать с выходными файлами. В CHID не допускаются точки или пробелы, потому что выходные файлы имеют расширения, несущие определенную информацию.

TITLE – строка не более 60 символов, которая описывает расчет. Представляет собой просто описательный текст, который передается в разные выходные файлы.

#### 6.2. Время моделирования: группа TIME (таблица 13.24)

TIME – название группы параметров, которые определяют длительность моделирования и исходный временной шаг, используемый для улучшения решения дискретизированных уравнений. В этой строке обязательно задать только длительность моделирования с помощью параметра T\_END (Time End). Значение по умолчанию – 1 секунда. **Примечание:** параметр TWFN еще работает, но вместо него рекомендуется использовать T\_END.

Например, следующая строка дает указание FDS выполнять моделирование в течение 5400с.

```
&TIME T_END=5400. /
```

Если T\_END равен нулю, выполняется только расчет структуры, что позволяет вам быстро проверить геометрию в Smokeview.

Если вы хотите, чтобы временная шкала начиналась не с нуля, можете использовать параметр T\_BEGIN (Time Begin), чтобы задать время, записанное в файле для первого временного шага. Это удобно для синхронизации временных шкал экспериментальных данных или видеозаписей.

T\_BEGIN применяется только для сдвига начала отсчета. На результатах моделирования это не скажется.

Основанные на времени RAMPы определяются по текущему времени, если время активации RAMP совпадает с T\_BEGIN; в противном случае они определяются согласно времени, в которое активируется RAMP. Таким образом, если вы задаете T\_BEGIN, чтобы проверить CTRL или DEVC привязанные к RAMP, то вам нужно задать T\_BEGIN так, чтобы он был немного меньше, чем то время, в которое произойдет активация RAMP. Например, если вы проверяете VENT, открывающийся в 10с, а его SURF\_ID использует

RAMP, to T\_BEGIN должен быть чуть меньше 10 с.

Величина исходного временного шага может быть задана параметром DT. Этот параметр обычно задается автоматически путем деления величины ячейки сетки на характеристическую скорость потока. Во время расчета временной шаг устанавливается таким образом, чтобы удовлетворялось условие КФЛ (Курант, Фридрихс, Леви). Значение DT по умолчанию  $5(\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}} / \sqrt{gH}$  секунд, где  $\delta x$ ,  $\delta y$  и  $\delta z$  – размер наименьшей ячейки сетки,  $H$  – высота вычислительного домена,  $g$  – ускорение свободного падения.

Если необходимо, чтобы что-то произошло сразу после запуска моделирования, например, срабатывание спринклера, целесообразно задать исходный шаг по времени во избежание неустойчивости численного решения, вызванной слишком большим шагом. Экспериментируйте с разными значениями DT, отслеживая величины исходного шага по времени, записанные в выходном файле **job\_name.out**.

В группе TIME есть дополнительный логический параметр SYNCHRONIZE, показывающий, что в параллельном расчете шаг по времени для каждой сетки должен быть одинаковым, в результате чего каждая сетка обрабатывается каждую итерацию. Дальнейшую информацию можно найти в разделе 6.3.2. Значение SYNCHRONIZE по умолчанию .TRUE.

### 6.3. Вычислительные сетки: группа MESH (таблица 13.11)

Все вычисления FDS выполняются в домене, который состоит из прямолинейных объемов, называемых сетками. Каждая сетка делится на прямоугольные ячейки, чье количество зависит от требуемого разрешения. MESH – группа параметров, которая определяет вычислительный домен. Сетка - это отдельный прямой параллелепипед. Система координат внутри сетки подчиняется правилу правой руки. Начало отсчета определяется первым, третьим и шестым значениям шестерки действительных чисел XB, а противоположный угол определяется вторым, четвертым и шестым значениями. Например,

&MESH IJK=10,20,30, XB=0.0,1.0,0.0,2.0,0.0,3.0 /

определяет сетку, которая охватывает объем, начинающийся в начале координат и простирающийся на 1 м в положительном направлении  $x$ , на 2 м в положительном направлении  $y$  и на 3 м в положительном направлении  $z$ . Сетка разбивается на одинаковые ячейки параметром IJK. В нашем примере сетка разделена на кубики по 10 см. Если нужно, чтобы ячейки сетки были неодинаковыми по размеру в определенном направлении, то группами TRNX, TRNY и/или TRNZ можно изменить однородность сетки (см. раздел 6.3.3).

Любые препятствия или вентиляционные отверстия, которые выходят за границы сетки, обрываются на границе. Определение объектов за пределами сетки ни на что не повлияет, и в Smokeview эти объекты тоже не появятся.

Внимание! Лучше всего, если ячейки сетки кубические, т.е. длина, ширина и высота ячеек приблизительно одинаковые.

Ввиду того, что в важной части вычисления задействован пуассоновский решатель, основанный на быстром преобразовании Фурье (БПФ) в направлениях  $y$  и  $z$ , второе и третье измерение сетки должны иметь вид  $2^l 3^m 5^n$ , где  $l$ ,  $m$ , и  $n$  – целые числа. Например,  $64 = 2^6$ ,  $72 = 2^3 3^2$  и  $108 = 2^2 3^3$  – это удачное деление ячеек сетки, а 37, 99 и 109 нет. Первое число разбиения на ячейки (I в IJK) не использует БПФ и не должно представляться в виде произведения. Но, тем не менее, вам нужно поэкспериментировать с различными величинами разбиения, чтобы быть уверенными в том, что конечные варианты не слишком замедляют вычисления.

Ниже приведен список чисел от 1 до 1024, которые можно разложить до двоек, троек и пятерок:

2	3	4	5	6	8	9	10	12	15	16	18	20	24	25
27	30	32	36	40	45	48	50	54	60	64	72	75	80	81
90	96	100	108	120	125	128	135	144	150	160	162	180	192	200
216	225	240	243	250	256	270	288	300	320	324	360	375	384	400
405	432	450	480	486	500	512	540	576	600	625	640	648	675	720
729	750	768	800	810	864	900	960	972	1000	1024				

### 6.3.1 Двухмерные и осесимметричные расчеты

Основные уравнения, решаемые в FDS, записаны в трехмерной прямоугольной системе координат. Но двухмерное прямоугольное или двухмерное цилиндрическое (осесимметричное) моделирование может быть выполнено, если J в тройке IJK в строке MESH задать 1. Для осевой симметрии в строку MESH добавьте CYLINDRICAL=.TRUE., и тогда координата  $x$  будет считаться радиальной координатой  $r$ . Ни на плоскостях  $y=YMIN=XB(3)$  или  $y=YMAX=XB(4)$ , ни на  $r=XMIN=XB(1)$  в осесимметричном вычислении, где  $r=XB(1)=0$  не должно быть установлено граничных условий. Для лучшей наглядности разница между XB(4) и XB(3) должна быть настолько мала, что изображение в Smokeview видится как двухмерное. Пример осесимметричного шлейфа из гелия (**helium\_2d**) приведен в V&V Guide.

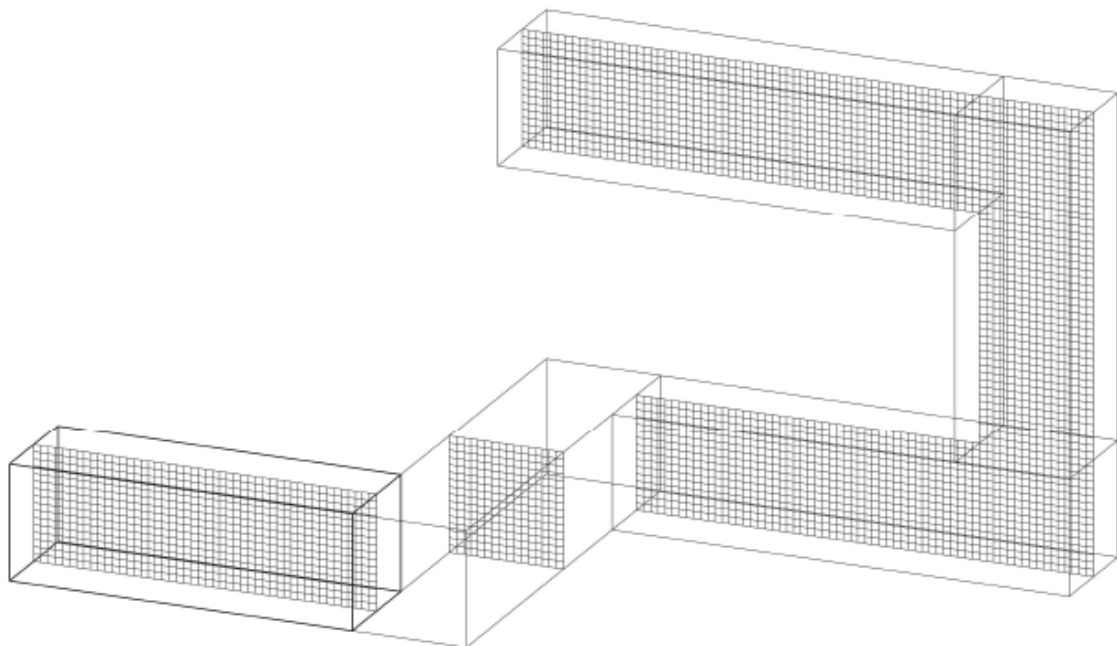


Рисунок 6.1: Вариант геометрии составной сетки

### 6.3.2 Составные сетки и параллельная обработка данных

Термин «составные сетки» означает, что вычислительный домен состоит нескольких вычислительных сеток, обычно соединенных, хотя и необязательно. В каждой сетке основные уравнения могут быть решены с шагом по времени, основанным на скорости потока в этой сетке. Из-за того, что каждая сетка может иметь разные шаги по времени, эта методика может сэкономить время ЦПУ, заставляя обновляться относительно грубые сетки только тогда, когда это необходимо. Грубые сетки лучше всего использовать в областях, где временные и пространственные градиенты основных величин малы или не важны. **Чтобы запустить параллельное вычисление FDS, вам нужно разбить вычислительный домен на составные сетки, чтобы каждый процессор обрабатывал одну сетку.** Независимо от того, будет ли вычисление выполняться на одном процессоре или на мультипроцессоре, составные сетки прописываются по схожим правилам, в которых нужно особо обратить внимание на некоторые аспекты. Ниже приведены рекомендации и предостережения по использованию составных сеток.

- Каждая сетка должна быть описана в отдельной строке MESH. Имеет значение порядок, в котором эти строки записываются во входной файл. В целом, сетки должны записываться от более точной к более грубой. FDS воспринимает первую указанную сетку во входном файле как имеющую приоритет перед сеткой, указанной второй, если две сетки частично накладываются друг на друга. Сетки могут частично накладываться, соприкасаться или вообще не соприкасаться. В сущности, в последнем случае два отдельных вычисления выполняются вообще без связи между собой. Препятствия и вентиляционные отверстия описываются в общей системе координат и не должны относиться к какой-либо одной определенной сетке. Каждая сетка проверяет координаты всех геометрических объектов, а затем включает их в расчет или нет.
- Старайтесь не задавать границы сетки там, где ожидаются критические события, особенно огонь. Иногда распространения огня от сетки к сетке нельзя избежать, но, если возможно, постарайтесь, чтобы на границах сеток не протекали сложные процессы, пока нам не удалось сделать обмен информацией через границы сеток таким же точным, как обмен от ячейки к ячейке внутри одной сетки.
- Информация из других сеток поступает только на внешнюю границу сетки. Это значит, что сетка, которая полностью вложена в другую, получает информацию на своей внешней границе, а более грубая сетка не получает ее из сетки, вложенной в нее. Получается, что более крупная, обычно более грубая, сетка осуществляет свое собственное моделирование сценария, не завися от меньшей, обычно более точной, вложенной в нее. Элементы из точной сетки, особенно относящиеся к развитию и распространению огня, могут не быть воспринятыми более грубой сеткой. В подобных случаях предпочтительнее изолировать огонь внутри одной сетки и установить более грубые сетки вокруг точной сетки. Тогда мелкая и грубая сетки обмениваются информацией между собой.
- Экспериментируйте с различными конфигурациями сеток с относительно грубыми ячейками, чтобы информация точно передавалась от сетки к сетке. Здесь следует обратить внимание на следующие аспекты. Во-первых, не получается ли, что граница сетки очень сильно влияет на поток? Если это так, то попробуйте отодвинуть границы сетки от области процесса. Во-вторых, нет ли слишком больших скачков между размерами ячеек в разных сетках? Если это так, то проверьте, является ли потеря информации от точной сетки к грубой допустимой.

- Будьте осторожны при использовании краткого условного обозначения для всей поверхности домена при назначении ему свободного граничного условия (OPEN). Эти обозначения будут относиться к каждой сетке. См. дополнительную информацию в разделе 7.3.
- В FDS 5 возможно поднять фоновое давление в зонах с разным давлением, даже если зоны давления пересекают границы сетки. См. дополнительную информацию в разделе 8.3.
- При параллельном вычислении вы можете сделать шаги по времени одинаковыми во всех сетках, если пропишете SYNCHRONIZE=.TRUE. в строке .TIME.

В FDS 5 эти условия стоят по умолчанию.
---

В этих условиях все сетки будут активными на каждой итерации. При работе на одном процессоре в многосеточных вычислениях этот метод снижает и может даже свести к нулю любой видимый эффект применения составных сеток. Но в параллельном вычислении, если определенная сетка не активна во время итерации, потому что она не готова к обновлению, процессор, приписанный к этой сетке, тоже неактивен. Заставить сетку обновиться с шагом по времени меньше идеального не требует дополнительных затрат времени, поскольку этот процессор все равно простаивает. Эффект состоит в том, что связи между сетками становятся крепче. Чтобы это осуществить, добавьте SYNCHRONIZE=.TRUE. в соответствующие строки MESH, а затем добавьте SYNCHRONIZE=.FALSE. в строку TIME.

- Если плоское препятствие находится рядом с тем местом, где две сетки соприкасаются, убедитесь, что каждая из сеток «видит» препятствие. Если препятствие хотя бы на миллиметр выходит за пределы одной из сеток, эта сетка не проводит вычислений по нему, и в этом случае информация между сетками передается некорректно.
- При параллельных расчетах эффективность вычислений можно проверить следующим образом: (1) прописать SYNCHRONIZE=.TRUE. в строке TIME, (2) прогнать несколько сотен шагов по времени, (3) вычислить разницу между временем расчета 200й итерации и 100й итерации (по информации в файле CHID.out (см. раздел 22.1). Разделите полученную разницу на 100. Результатом будет среднее реальное время для вычисления шага по времени, (4) посмотреть на ЦПУ/шаг для каждой сетки. Наибольшее значение должно быть меньше, но близко к прошедшему реальному времени. Эффективность параллельного вычисления – максимальный ЦПУ/шаг, разделенный на среднее реальное время на шаг. Если это число между 90% и 100%, параллельный код работает хорошо.

### 6.3.3 Преобразования сетки: группы TRNX, TRNY и/или TRNZ (таблица 13.25)

По умолчанию ячейки сетки, заполняющей вычислительный домен, являются одинаковыми по размеру. Но можно определить ячейки как неоднородные в одном или двух координатных направлениях. Для заданного направления – x, y, или z – можно задать функцию, преобразующую сетку из однородной в неоднородную. **Будьте осторожны с преобразованиями сетки!** Если вы уменьшаете ячейки в одной области, то в другой вы должны их растянуть. Когда один или два координатных направления преобразованы, коэффициент пропорциональности ячеек в 3D сетке будет меняться. В целях предосторожности нужно избегать преобразований, которые изменяют коэффициент

пропорциональности ячеек свыше 2 и 3. Помните, что методика масштабного моделирования вихрей основывается на предположении, что численная сетка достаточно точна для образования вихрей, отвечающих за смешивание. Вообще образование вихрей ограничено наибольшим размером ячейки сетки, таким образом, уменьшение разрешения сетки в одном или двух направлениях необязательно приведет к лучшему результату, если третье измерение велико.

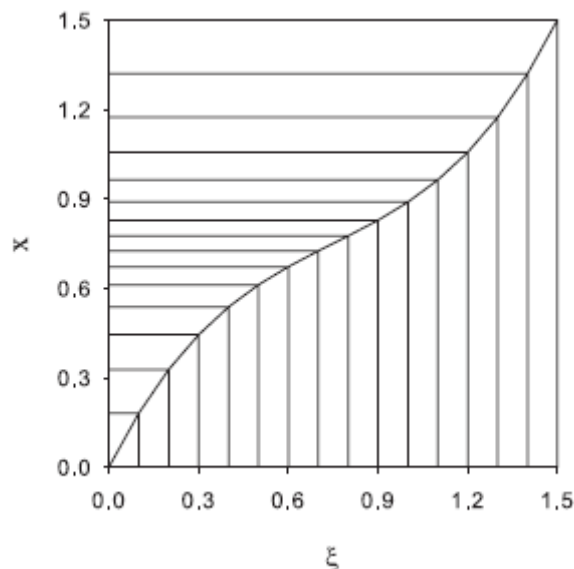
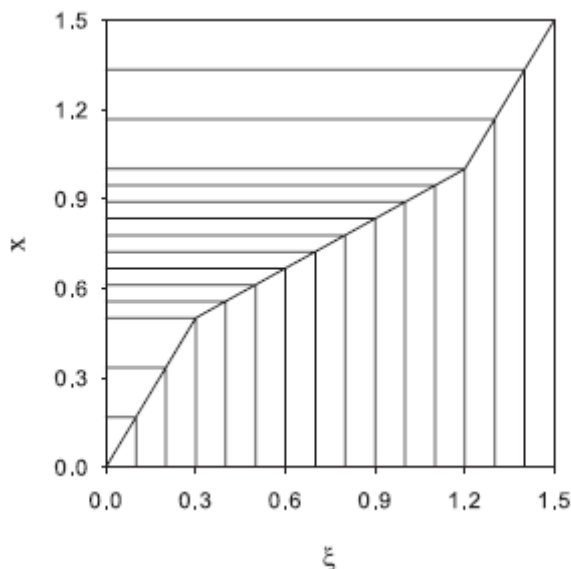


Рис. 6.2 Кусочно-линейное преобразование      Рис.6.3 Полиномиальное преобразование

Преобразования в целом снижают эффективность расчета, а преобразования по двум координатам снизят ее больше, чем преобразование в одном направлении. Экспериментируйте с разными способами, чтобы узнать, какой уровень вам подойдет.

Ниже приведен пример трансформации сетки. Предположим, ваша сетка определяется так:

```
&MESH IJK=15,10,20, XB=0.0,1.5,1.2,2.2,3.2,5.2 /
```

и вы хотите изменить равномерность ячеек в направлении  $x$ . Прежде всего, взгляните на рисунки, изображенные выше. Вам нужно определить функцию  $x = f(\xi)$ , которая преобразует равномерную расчетную координату (ПК( $ru$ )/СС( $en$ ))  $0 \leq \xi \leq 1.5$  в физическую координату (ФК( $ru$ )/РС( $en$ ))  $0 \leq x \leq 1.5$ . Функция имеет три обязательных ограничивающих условия: она должна быть монотонной (всегда возрастающей), преобразовывать  $\xi=0$  в  $x=0$  и  $\xi=1.5$  в  $x=1.5$ . По умолчанию функция преобразования  $f(\xi)=\xi$  для однородной сетки, но в этом случае вам ничего не нужно делать.

Допускаются два типа преобразовательных функций. Первая, простейшая, представляет собой кусочно-линейную функцию. Пример кусочно-линейного преобразования изображен на рис. 6.2. График показывает, как 15 однородных ячеек сетки по горизонтальной оси преобразуются в неоднородные ячейки по вертикальной оси. В этом случае функция состоит из прямых сегментов, соединяющих точки (ПК, ФК) в порядке возрастания, как описано в следующих строках входного файла:

```
&TRNX CC=0.30, PC=0.50, MESH_NUMBER=2 /
&TRNX CC=1.20, PC=1.00, MESH_NUMBER=2 /
```

Параметр ПК относится к расчетной координате  $\xi$ , расположенной на горизонтальной оси; ФК – физическая координата  $x$ , расположена на вертикальной оси. Наклон линейных

сегментов в графике показывают, вытянута ли сетка (наклон больше 1) или сжата (наклон меньше 1). Самое сложное в этом процессе то, что обычно требуемое вытягивание/сжатие для физической координаты происходит на вертикальной оси, необходимо обратное преобразование, чтобы определить соответствующие точки для расчетной координаты на горизонтальной оси. Обратите внимание на то, что вышеприведенное преобразование относится ко второй сетке в работе составной сетки.

Второй тип преобразований – полиномиальная функция, чьи граничные условия имеют следующий вид:

$$\frac{d^n f(PK)}{d\xi^n} = \Phi K$$

Рис.6.3 дает пример полиномиального преобразования, для которого определены параметры (предполагая, что это третья сетка)

```
&TRNX IDERIV=0, CC=0.75, PC=0.75, MESH_NUMBER=3 /
&TRNX IDERIV=1, CC=0.75, PC=0.50, MESH_NUMBER=3 /
```

соответствующие граничным условиям  $f(0.75)=0.75$  и  $\frac{df}{d\xi}(0.75) = 0.5$  или, иными словами,

функция преобразует 0,75 в 0,75 и кривизна функции при  $\xi=0.75$  равен 0.5. Функция преобразования должна также проходить через точки (0,0) и (1.5,1.5), т.е. FDS должна вычислить коэффициенты для кубического многочлена  $f(\xi)=c_0+c_1\xi+c_2\xi^2+c_3\xi^3$ . Большое количество граничных условий ведет к полиномиальным функциям более высокого порядка, поэтому будьте с ними осторожны, они могут сделать функцию немонотонной. Монотонность функции проверяется программой, и если она немонотонна, появится сообщение об ошибке.

### 6.3.4 Выбор оптимального размера сетки

Новички в FDS обычно задают вопрос: «Какой размер сетки я должен выбрать?» Ответ не так прост, потому что он в значительной степени зависит от того, что вы хотите сделать. Вам нужно создать входной файл FDS с относительно грубой сеткой, а затем постепенно уменьшать до тех пор, пока вы не перестанете замечать видимой разницы в результатах. Формально это называется анализ чувствительности сетки.

В моделировании с восходящими пламенами критерий точности разрешения сетки определяется по безразмерному выражению  $D^*/\delta x$ , где  $D^*$  - характеристический диаметр огня

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (6.1)$$

а  $\delta x$  – номинальный размер ячейки сетки<sup>1</sup>. Величина  $D^*/\delta x$  может быть расценена как число вычислительных ячеек, охватывающих характеристический (необязательно физический) диаметр огня. Чем больше ячеек охватывают огонь, тем лучше разрешение модели. Лучше оценивать качество сетки на основе этого безразмерного параметра, чем

<sup>1</sup> Характеристический диаметр огня относится к характеристическому размеру огня через уравнение  $Q^*=(D^*/D)^{5/2}$ , где D – это физический диаметр огня.

по абсолютному размеру ячейки сетки. Например, размер ячейки в 10 см может быть адекватным в некотором смысле для оценки распространения дыма и тепла по зданию при пожаре, но оказаться непригодным для анализа маленького, тлеющего источника огня.

Например, в анализе чувствительности сетки NUREG 1824[4], значения  $D^*/\delta x$  варьировались от 4 до 16. Эти значения использовались для адекватного разрешения динамики факела, а также других геометрических характеристик моделей. Этот диапазон не показывает, какие значения использовать для всех моделей, а только то, какие значения подходили определенному ряду моделей.

#### **6.4 Вспомогательные параметры: группа MISC (таблица 13.12)**

MISC – группа вспомогательных глобальных входных параметров. В файл данных нужно вписать только одну строку MISC. Например, входная строка

```
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE',TMPA=25. /
```

определяет, что все граничные поверхности сделаны из CONCRETE (бетон), если другое не определено, а температура окружающей среды 25°C.

Параметры MISC различаются по области применения и степени важности. Ниже приведен неполный список параметров MISC. Остальные описываются далее в тексте руководства.

DNS – логический параметр, который в случае .TRUE., предписывает FDS выполнить Direct Numerical Simulation (прямое численное моделирование) вместо заданного по умолчанию Large Eddy Simulation (масштабное моделирование вихрей).

GVEC Задаёт три компоненты тяготения в  $\text{м/с}^2$ . По умолчанию GVEC=0,0,-9.81.

HUMIDITY Относительная влажность в %. Должна быть указана только в том случае, если в моделировании присутствует источник воды помимо самого огня. В противном случае водяной пар не отслеживается явно. По умолчанию 40%.

ISOTHERMAL Логический параметр, который показывает, что вычисления не включают никаких изменений в температуре или переносе теплоты излучения, сокращая таким образом количество уравнений, которые надо решить, и упрощая имеющиеся. Автоматически задаёт RADIATION как .FALSE.

NOISE FDS инициализирует поле течения с небольшим количеством «шума», чтобы предотвратить развитие абсолютно симметричного течения, когда границы и исходные условия совершенно симметричны. Чтобы отключить параметр, задайте NOISE=.FALSE.

P\_INF Фоновое давление (на земле) в Па. По умолчанию 101325 Па.

RADIATION Логический параметр, указывающий, нужно ли вычислять перенос излучения. По умолчанию .TRUE.

SUPPRESSION Логический параметр, указывающий, должна ли FDS включать подавление пламени в газообразной фазе. По умолчанию .TRUE.



**SURF\_DEFAULT** Строка SURF содержит то, что будет относиться ко всем границам, если другое не определено. По умолчанию стоит 'INERT' - холодная, не реагирующая твердая граница. Вам не нужно указывать INERT в строке SURF.

**TEMPA** Температура окружающей среды, температура всего на начало моделирования. По умолчанию 20°C.

**U0, V0, W0** – начальные величины скорости газа в каждом из координатных направлений. Обычно они все равны 0 м/с, но в некоторых случаях удобно запускать поток сразу же, например, в моделировании ветра вне помещения.

#### **6.4.1 Остановка и перезапуск вычислений**

Важный параметр MISC называется RESTART. Обычно расчет состоит из последовательности событий, начиная с условий окружающей среды. Но есть случаи, когда нужно остановить вычисления, сделать необходимые изменения, а затем перезапуститься с этого момента времени. Чтобы это сделать корректно, остановите вычисления, создав файл под названием **CHID.stop** в директории, где расположены выходные файлы. Помните, что программа FDS чувствительна к регистру. Название файла должно быть точно таким же, что и CHID, а «stop» должен быть нижнего регистра. FDS проверяет наличие этого файла на каждом временном шаге, и если находит его, создает файл Plot3D и файл (или файлы в случае работы составных сеток) под названием **CHID.restart** (или **CHID\_nn.restart**) и аккуратно останавливает вычисление. Чтобы перезапустить работу, файл(ы) **CHID.restart** должны присутствовать в рабочей директории, а выражение RESTART=TRUE. нужно добавить в строку MISC входного файла. Например, предположим, что работа, чей CHID – «plume», остановлена созданием пустого файла plume.stop в директории, где создаются все выходные файлы. Чтобы перезапустить эту работу с того момента, где она остановилась, вставьте RESTART=TRUE. в строку MISC входного файла **plume.fds** или свое название входного файла. Наличие файла перезапуска с тем же CHID, что и оригинальная работа, приказывает FDS продолжить сохранение новых данных в те же самые файлы, что и старые. Если RESTART\_CHID также задан в строке MISC, FDS будет искать старые выходные файлы, обозначенные этой строкой вместо использования указанного CHID в строке HEAD. В этом случае новые выходные файлы будут помечены CHID, а старые выходные файлы останутся без изменения.

При перезапуске работы диагностика выводится в файл **CHID.out**, который был создан оригинальной работой. Все другие выходные файлы оригинального запуска также продолжаются.

Бывает так, что периодически нужно сохранять файлы перезапуска в течение работы в качестве подстраховки на случай прекращения подачи электропитания или сбоя системы. В этом случае задайте, например, DT\_RESTART=50. в строке DUMP, чтобы сохранять файлы перезапуска каждые 50с. По умолчанию для DT\_RESTART установлено 1000000, что означает, что файлы перезапуска не будут создаваться, пока вы не остановите корректно работу, создав пустой файл **CHID.stop**.

Также можно использовать новую функцию управления (см. раздел 11.5) для остановки расчета или создания файла перезапуска, когда расчет достигает некоторого измеримого состояния, как, например, первое включение спринклера.

Между остановкой и перезапуском работы в расчете нельзя сделать значительных изменений, таких как добавление или удаление вентиляционных каналов и препятствий.

Изменения ограничены теми параметрами, которые не меняют существующее поле течения мгновенно. Поскольку возможность перезапуска нечасто используется разработчиками, к ней следует относиться как к хрупкой конструкции. Проверьте выходные данные, чтобы убедиться, что во время остановки и перезапуска не произойдет ничего неожиданного или внезапного.

#### 6.4.2 *Дополнительный вопрос: Пренебрежение силой тяжести*

В большинстве случаев ускорение свободного падения направлено в отрицательном направлении оси z или, проще говоря, вниз. Чтобы изменить направление силы тяжести, для моделирования, например, покато́й крыши или туннеля, нужно задать вектор силы тяжести в строке MISC с тройкой чисел в виде GVEC=0.0, 0.0, -9.81 (единицы – м/с<sup>2</sup>). Это вектор по умолчанию, но его можно изменить на любое направление.

Замечание: если заданы спринклеры, вектор силы тяжести меняться не должен. Для большей части логической схемы, управляющей траекториями капель воды над твердыми предметами, сила тяжести стремится к отрицательному направлению z.

В некоторых особых случаях вам может понадобиться изменить вектор силы тяжести во времени, например, для условий космического корабля. Вектор силы тяжести, GVEC, может быть задан временной функцией с помощью кусочно-линейной функции для отдельных компонентов RAMP\_GX, RAMP\_GY и RAMP\_GZ, все задаются в строке MISC. В разделе 8.5 вы можете больше узнать о RAMP.

#### 6.4.3 *Дополнительный вопрос: Восстановление бароклининой завихренности*

Ниже представлено приближение, когда решение для давления можно представить в виде

$$\nabla \cdot \frac{1}{p} \nabla \tilde{p} = \frac{1}{p_\infty} \nabla^2 \tilde{p} \quad (6.2)$$

Результат этого приближения состоит в том, что вихри, образованные из-за пренебрежения плотностью и градиентом давления или бароклининым моментом силы, в расчет не принимаются. Для большинства масштабных вычислений предположение оправдывается тем фактом, что подъемная сила является основным источником вихрей. Из-за пренебрежения бароклининым моментом силы, решение эллиптического дифференциального уравнения в частных производных, полученного на основе разницы уравнения импульса, значительно упрощается. Но в коде есть опция для восстановления бароклининого момента силы путем разложения соответствующего члена в уравнении для давления

$$\nabla \cdot \frac{1}{p^n} \nabla \tilde{p}^n = \nabla \cdot \frac{1}{p} \nabla \tilde{p}^n + \nabla \cdot \left( \frac{1}{p^n} - \frac{1}{p^{-n}} \right) \nabla \tilde{p}^{n-1} \quad (6.3)$$

и определением второго члена из правой части уравнения по значению давления на предыдущем временном шаге. В выражении  $\rho$  – средняя плотность, равная  $2\rho_{\min}\rho_{\max}/(\rho_{\min} + \rho_{\max})$ . Чтобы выполнить коррекцию, просто впишите выражение BAROCLINIC=.TRUE. в строку MISC. В расчете DNS (DNS=.TRUE.), коррекция проводится по умолчанию. Но для расчета LES (режим по умолчанию) коррекция должна быть явно задана. Коррекция не окажет большого влияния на результат – попробуйте сделать расчеты с ней и без нее, чтобы выяснить, нужна ли она.

#### 6.4.4 Дополнительный вопрос: Образование тяги

В высоких зданиях выталкивающая сила часто вызывает движение воздуха из-за разницы внутренней и внешней температуры, это называется образование тяги. Чтобы воссоздать это явление в FDS, в вычислительный домен нужно включить все здание или значительную его часть, как снаружи, так и изнутри. Важно зафиксировать снижение давления и плотности атмосферы, основываясь на заданной температуре LAPSE\_RATE (°C/м), прописанной в строке MISC. Экспериментируйте с разными способами разбивки на ячейки до включения любого пожара или функции HVAC. Постепенно усложняйте модель. Пример приведен в разделе 15.2.4.

#### 6.4.5 Дополнительный вопрос: Параметры масштабного вихревого моделирования

В режиме по умолчанию FDS использует модель Смагоринского для масштабного вихревого моделирования, чтобы рассчитать турбулентность подсеточного масштаба. Вязкость  $\mu$  рассчитывается так:

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 \left( 2 \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

где  $C_s$  – эмпирическая константа,  $\Delta$  – длина порядка размера координатной сетки. Черта над некоторыми величинами означает, что они являются вычисленными или фильтрованными значениями, то есть то, что они вычислены на числовой сетке. Остальные диффузные параметры, теплопроводность и диффузность связаны с турбулентной вязкостью уравнением:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr_t}; (pD)_{t,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t} \quad (6.5)$$

Турбулентные числа Прандтля  $Pr_t$  и Шмидта  $Sc_t$  считаются постоянными для данного расчета. Хотя это и не рекомендуется для большинства вычислений, вы можете изменить  $C_s = 0.2$ ,  $Pr_t = 0.5$  и  $Sc_t = 0.5$  через параметры CSMAG, PR и SC в строке MISC. Более подробное описание этих параметров дано в Техническом справочнике FDS [1].

#### 6.4.6 Дополнительный вопрос: Параметры численной устойчивости

Шаг расчета по времени ограничен конвективными и диффузионными транспортными скоростями с помощью двух условий. Первое известно как условие Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ). Условие КФЛ утверждает, что решение уравнений не может изменяться в соответствии с большим временным шагом, чем тот, который пропускает определенный объем текучей среды на расстояние размера ячейки сетки. В каждой ячейке сетки размером  $\delta x$  на  $\delta y$  на  $\delta z$  с компонентами скорости  $u$ ,  $v$  и  $w$  число КФЛ определяется так:

$$CFL = \delta t \max \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (6.6)$$

На каждом временном шаге число КФЛ вычисляется в каждой ячейке сетки, а временной шаг  $\delta t$  изменяется в том случае, если максимальная величина числа КФЛ не входит в

диапазон от CFL\_MIN до CFL\_MAX, чьи значения по умолчанию 0.8 и 1.0 соответственно. Эти значения входят в группу MISC.

Подобное условие, но ограничивающее временной шаг, когда преобладает диффузионный перенос, иногда называется условием фон Ноймана. Число фон Ноймана определяется так:

$$VN = 2 \max \left( v, D, \frac{k}{\rho c_p} \right) \delta t \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (6.7)$$

Как и число КФЛ, ФН вычисляется в каждой ячейке, а временной шаг изменяется, если ФН лежит за пределами диапазона от VN\_MIN до VN\_MAX, которые равны 0.8 и 1.0 по умолчанию. Обратите внимание, что это ограничение относится к уравнениям импульса, массы и энергии через соответствующий диффузионный параметр – вязкость, диффузность материала или теплопроводность. Это ограничение во временном шаге типично для явно заданной численной схемы второго порядка точности для решения параболического дифференциального уравнения в частных производных. В целях экономии времени ЦПУ критерий фон Ноймана участвует только в вычислениях DNS или LES с ячейками меньше 5 мм.

Перенастройка параметров устойчивости рекомендуется только в особых случаях, поскольку это может привести к сбоям в расчетах из-за численной неустойчивости.

## 6.5 Дополнительный вопрос: Нестандартные начальные условия: группа INIT (таблица 13.8)

Обычно начальные условия соответствуют условиям окружающей среды. Температура воздуха считается постоянной по высоте, а плотность и давление уменьшаются по высоте (направление z). Это снижение незаметно в большинстве расчетов в пределах здания, но имеет значение в масштабных моделях вне помещения. Существует несколько сценариев, для которых удобно изменять условия внешней среды в пределах некоторой прямоугольной области домена. Если это нужно, вставьте строки следующего вида:

```
&INIT XB=0.5,0.8,2.1,3.4,2.5,3.6, TEMPERATURE=30. /
```

Здесь, в пределах области, границы которой заданы шестеркой чисел XB, начальная температура должна быть 30°C вместо температуры окружающей среды. Эта структура может быть применена для DENSITY или MASS\_FRACTION(N), где N указывает на N-ое вещество, которые перечислены во входном файле.

Логическая структура INIT может быть полезна при исследовании образования тяги в здании, где температура внутри отличается от температуры снаружи.

Заметьте, твердому препятствию может быть задана начальная температура с помощью параметра TMP\_INNER в строке SURF. Начальную скорость можно прописать через U0, V0 и W0 в строке MISC.

## **6.6 Дополнительный вопрос: Границы настроек: группа CLIP (таблица 13.2)**

Время от времени может понадобиться задать верхние и нижние границы плотности, температуры или массовую долю компонента. Параметры, перечисленные в таблице 13.2, приведены только для диагностики.

## Глава 7

### Построение модели

Значительная часть работы по построению модели состоит в описании геометрии и соотношении граничных условий с объектами. Геометрия описывается в терминах прямоугольных препятствий, которые могут нагреваться, гореть, проводить тепло и т.д.; и вентиляционных отверстий, через которые воздух или топливо могут подаваться и удаляться из домена. Граничное условие должно быть определено для каждого препятствия и вентиляционного отверстия, описывать его температурные свойства. Огонь – это всего лишь один из видов граничных условий. В этой главе рассказывается, как построить модель. В следующей главе будет рассказано, как соотнести свойства и границы.

#### 7.1 Создание препятствий: группа OBST (таблица 13.13)

Группа OBST содержит параметры для описания препятствий. Каждая строка OBST содержит координаты прямоугольного твердого тела в пределах домена. Это твердое тело задается двумя точками  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ , которые записываются в строке OBST с помощью параметра XB= X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2. В дополнение к координатам граничные условия для препятствий могут быть заданы параметром SURF\_ID, который определяет, какую группу SURF (Раздел 8.2) применить к поверхности препятствия. Если свойства верхней, нижней и боковых сторон препятствия не одинаковы, не стоит использовать SURF\_ID. Вместо этого используйте SURF\_IDS, массив из трех символьных строк, определяющих ID граничных условий для верха, сторон и низа препятствия соответственно. Если нужно граничное условие по умолчанию, не нужно прописывать SURF\_ID(S). Но если хотя бы одна из поверхностей инертна по умолчанию, ее можно обозначить как 'INERT'. Например:

```
&SURF ID='FIRE',HRRPUA=1000.0 /
&OBST XB=2.3,4.5,1.3,4.8,0.0,9.2,SURF_IDS='FIRE','INERT','INERT' /
```

помещает огонь на верх препятствия. Это простой способ задать горелку. Некоторые дополнительные особенности препятствий следующие:

- Кроме SURF\_ID и SURF\_IDS вы можете применить шестерку SURF\_ID6 следующим образом:

```
&OBST XB=2.3,4.5,1.3,4.8,0.0,9.2,
      SURF_ID6='FIRE','INERT','HOT','COLD','BLOW','INERT' /
```

где 6 описаний относятся к плоскостям  $x = 2.3$ ,  $x = 4.5$ ,  $y = 1.3$ ,  $y = 4.8$ ,  $z = 0.0$  и  $z = 9.2$  соответственно. Обратите внимание, что SURF\_ID6 не должны стоять в той же строке OBST, что и SURF\_ID или SURF\_IDS.

- Препятствия могут иметь нулевую толщину. Часто тонкие листы, например окно, образуют барьер, но если численная сетка слишком крупная по отношению к толщине барьера, препятствие может быть излишне крупным, если предполагается, что толщина составляет один слой ячеек. Все грани препятствий смещаются к ближайшей ячейке. Если препятствие очень тонкое, две грани могут оказаться приблизительно на одной и той же поверхности ячейки. FDS и Smokeview изображают это препятствие в виде тонкого листа, но допускается наличие термически толстых граничных условий. Но эта функция нестабильна, особенно если есть горящий и взрывающийся газ. Тонкое листовое препятствие может иметь только один вектор скорости на поверхности, т.е. нельзя

достоверно подавать газ с тонкого препятствия, потому что предмет, испытывающий давление с одной стороны, обязательно натягивается с другой. Для достижения полной функциональности препятствие должно быть задано толщиной как минимум в одну ячейку. Тонкие листовые препятствия отлично служат барьерами для потоков, но другие функции капризны и должны применяться с осторожностью. Чтобы FDS не допускала наличие тонких листовых препятствий, впишите `THICKEN_OBSTRUCTIONS=.TRUE.` в строку `MISC` или `THICKEN=.TRUE.` в каждую строку `OBST`, где тонкие листы недопустимы.

- В отличие от ранних версий FDS в этой версии не рассматриваются слишком маленькие относительно численной сетки препятствия. Будьте осторожны при расчетах на крупных сетках.
- Препятствия можно создавать и удалять во время расчета. См. раздел 11.4.1.
- Если два препятствия перекрываются на одной или более поверхностях, то, которое записано последним во входном файле, обладает приоритетным по отношению к тому, который записан первым, т.е. перекрывающаяся грань будет иметь свойства последней поверхности. Smokeview представляет оба препятствия независимо друг от друга, что зачастую приводит к некрасивой двуцветной штриховке в местах частичного наложения. Простой способ избавиться от этого – слегка сжать первое препятствие, подстроив его координаты (XB) соответственно. Затем в Smokeview нажмите клавишу «q», чтобы показать препятствия так, как вы их задали, а не так, как их изобразила FDS.
- Можно запретить создание отверстий в препятствии. Иногда с помощью `HOLE` удобно создать дверь или окно. Например, предположим, в стене проделано `HOLE` для обозначения двери или окна. Можно создать препятствие для заполнения этого отверстия (к примеру, чтобы убрать или окрасить в другой цвет или еще для чего-то), если выражение `PERMIT_HOLE=.FALSE.` включено в строку `OBST`. Вообще, используя эту фразу, можно запретить создание отверстий в любом препятствии. По умолчанию прописано `PERMIT_HOLE=.TRUE.`, то есть препятствие воспринимается как проницаемое, если не указано обратное.
- Если по каким-либо причинам нужно, чтобы препятствие не исчезало, задайте `REMOVABLE=.FALSE.` Иногда это нужно, чтобы FDS не убирал препятствие, если оно вложено в другое, как дверь в стене.
- В некоторых случаях вам может понадобиться запретить создание `VENT` на определенных препятствиях, в этом случае задайте `ALLOW_VENT=.FALSE.`
- Препятствия можно сделать полупрозрачными, обозначив `TRANSPARENCY` в строке `OBST`. Этот действительный параметр изменяется от 0 до 1, где 0 – полная прозрачность. Параметр всегда должен быть задан совместно с `COLOR` или тройкой `RGB`. Его также можно задать в соответствующей строке `SURF` вместе с индикатором цвета.
- В Smokeview препятствия по умолчанию изображаются как твердые тела. Чтобы изобразить только контуры, задайте `OUTLINE=.TRUE.`

### 7.1.1 Непрямоугольная геометрия и наклонные потолки

Иногда встречаются ситуации, когда определенные геометрические особенности не описываются прямоугольной сеткой, например, наклонные потолки или крыша. В этих случаях постройте препятствия с помощью прямоугольных, иногда этот метод называется «ступенчатость». Суть состоит в том, что ступенчатость изменяет структуру потока у стены. Чтобы снизить влияние ступенчатости на поле течения около стены, добавьте параметр

SAWTOOTH=.FALSE.

в каждую строку OBST, которая описывает ступенчатое препятствие. Действие этого параметра предотвращает образование вихрей на острых углах, фактически сглаживая зубцы. Это не решает проблему полностью, но это простейший способ, который позволяет полю течения не задерживаться у прямоугольного препятствия из-за дополнительного сопротивления, которое создается на острых углах.

Не задавайте SAWTOOTH=.FALSE. для препятствий, у которых есть SURF\_ID с атрибутом BURN\_AWAY=.TRUE.

### 7.2 Создание отверстий: группа HOLE (таблица 13.7)

Группа HOLE определяет параметры (таблица 13.7) для образования отверстия в существующем препятствии или ряде препятствий. Чтобы это сделать, вставьте строки следующего вида:

```
&HOLE XB=2.0,4.5,1.9,4.8,0.0,9.2 /
```

Все ячейки твердых тел в блоке  $2.0 < x < 4.5$ ,  $1.9 < y < 4.8$ ,  $0.0 < z < 9.2$  удаляются. Препятствия, пересекающие блок, разбиваются на более мелкие блоки.

Если отверстие является дверью или окном, опыт подсказывает задавать отверстие чуть шире, чем это необходимо. Это гарантирует, что отверстие будет сквозным.

Например, если строка OBST относится к стене толщиной в 0,1 м:

```
&OBST XB=1.0,1.1,0.0,5.0,0.0,3.0 /
```

и вы хотите сделать дверь, добавьте:

```
&HOLE XB=0.99,1.11,2.0,3.0,0.0,2.0 /
```

Дополнительный сантиметр, прибавленный к координатам  $x$  отверстия, поясняет, что отверстие должно быть сквозным.

Отверстие может открываться/закрывается при определенных условиях (См. раздел 11.4.1.). Чтобы отверстие управлялось группами CTRL или DEVC, нужно вписать параметр CTRL\_ID или DEVC\_ID соответственно в строку HOLE.

Если нужно, чтобы препятствия, в которых должны быть отверстия, имели цвет, отличающийся от первоначального, пропишите COLOR или тройку целых чисел RGB в строке HOLE (см. раздел 8.6).



Когда HOLE в состоянии .FALSE., внутри отверстия находится препятствие. Чтобы сделать это препятствие прозрачным, параметр TRANSPARENCY нужно задать действительным числом от 0 до 1. Помните, что если задан TRANSPARENCY, то также нужно задать и COLOR или тройку RGB. Значение TRANSPARENCY, близкое, но не равное нулю может служить для моделирования окна, когда INITIAL\_STATE=.FALSE. Когда активируются DEVC или CTRL и меняют состояние отверстия на .TRUE., отверстие открыто и полностью прозрачно. См. пример в разделе 17.6.1.

Если препятствие не должно быть пробито HOLE, вставьте PERMIT\_HOLE=.FALSE. в строку OBST.

Очень удобно проверять геометрию запуском работы (T\_END=0 в строке TIME) или кратковременной работой, чтобы испытать работу устройств и функций управления.

Помните, что HOLE никак не влияет на VENT или границу сетки. Он относится только к препятствиям.

### 7.3. Применение свойств поверхности: группа VENT (таблица 13.26)

Тогда как группа OBST призвана определять препятствия в вычислительном домене, группа VENT (таблица 13.26) задает плоскости, прилегающие к препятствиям или внешним стенам. Вентиляционные отверстия задаются так же, как и препятствия, с помощью шестерки чисел XB, обозначающих плоскость, прилегающую к твердой поверхности. По одной из осей координаты должны быть одинаковыми.

Помните, что для любой заданной ячейки стены можно указать только один VENT. Если указываются какие-либо дополнительные строки VENT, FDS выдаст предупреждающее сообщение и не воспримет последующие строки (т.е. считаться будет только первый vent).

Термин «VENT» можно понимать по-разному. В буквальном смысле VENT может применяться для моделирования компонентов вентиляционной системы здания, таких как распылитель или исходящая вентиляционная струя. В этих случаях координаты VENT формируют плоскость на твердой поверхности, формируя границу канала. В твердом теле не нужно создавать никаких отверстий; предполагается, что воздух подается или всасывается через канал в стене. В более широком смысле VENT – это способ соотнесения определенного граничного условия с прямоугольным участком поверхности твердого тела. Пожар, например, создается сначала построением твердого препятствия через строку OBST, а затем определением VENT где-нибудь на одной из граней твердого тела с SURF\_ID с характеристиками термических свойств и параметров горения топлива. Например, строки

```
&OBST XB=0.0,5.0,2.0,3.0,0.0,4.0, SURF_ID='big block' /  
&VENT XB=1.0,2.0,2.0,2.0,1.0,3.0, SURF_ID='hot patch' /
```

задают большое препятствие (со свойствами, приведенными еще где-нибудь в файле, и названием `big block` «большой блок») с «участком», относящимся к одной из его граней, с другими свойствами и названием `hot patch` «горячий участок». Это последнее свойство поверхности на самом деле может быть не «вентиляционным отверстием» приточной или вытяжной вентиляции, а просто участком с другими граничными условиями, а не условиями, принятыми для препятствий. Заметьте, что свойства поверхности VENT доминируют над свойствами нижележащего препятствия.

В отличие от предыдущих версий FDS здесь вы не можете задавать независимый вентилятор, используя функцию VENT. VENT всегда должен быть прикреплен к твердому препятствию. Указания по определению разных типов вентиляторов см. в разделе 8.2.3.

Простой способ задать свойство для внешней стены целиком – это заменить XB на MB (Mesh Boundary/граница сетки), символьную строку, значение которой одно из следующих: 'XMAX', 'XMIN', 'YMAX', 'YMIN', 'ZMAX' или 'ZMIN', которые обозначают плоскости  $x = XMAX$ ,  $x = XMIN$ ,  $y = YMAX$ ,  $y = YMIN$ ,  $z = ZMAX$  или  $z = ZMIN$  соответственно. Как и для препятствия, индекс граничного условия вентиляционного отверстия задается с помощью SURF\_ID, указывая, какую из перечисленных строк SURF использовать. Если используется граничное условие по умолчанию, задавать SURF\_ID не надо.

Будьте осторожны при использовании сокращения MB, выполняя расчет составной сетки, т.е. когда используется больше, чем одна сетка. Плоскость, назначенная ключевым словом MB, относится ко всем этим сеткам – неважно, является ли плоскость твердой стеной или открытой границей. Проверьте геометрию в Smokeview, чтобы убедиться, что VENT прописаны правильно. Используйте как можно больше цветов для двойной проверки структуры. Информация о цвете находится в разделе 8.6 и таблице 8.1. Кроме того, параметр OUTLINE=.TRUE. заставляет VENT в Smokeview отображаться схематично.

### 7.3.1 Особые VENTы

Для VENT есть два зарезервированных SURF\_ID - 'OPEN' и 'MIRROR'. Термин «зарезервированные» означает, что эти два SURF\_ID не должны быть определены вами. Их свойства предопределены.

#### «OPEN» VENT

Этот VENT запускается параметром SURF\_ID='OPEN'. Он используется, только если VENT относится к внешней границе вычислительного домена, где задается пассивное вентиляционное отверстие. По умолчанию FDS подразумевает, что внешняя граница вычислительного домена (XB в строке MESH) является твердой стеной. Чтобы это изменить, воспользуйтесь свойством OPEN – например, для создания открытой двери или окна. Для создания полностью или частично открытого домена воспользуйтесь OPEN на внешних границах сетки (MB).

По умолчанию считается, что условия окружающей среды существуют за пределами вентиляционного отверстия OPEN. Но в некоторых случаях вы можете изменить эти условия, например, температуру. Если нужна температура не окружающей среды, задайте TMP\_EXTERIOR вместе с SURF\_ID='OPEN'. Пользуйтесь этой опцией осторожно, т.к. во многих ситуациях, чтобы описать наружную часть здания, лучше включить его в расчет явно, потому что тогда поток через окна и двери будет смоделирован более естественно. Более подробно см. раздел 6.4.4.

Как и в случае с внешней температурой, чтобы поменять внешнюю массовую долю отдельных видов газа, задайте MASS\_FRACTION (N) в строке VENT, где N относится к индексу вещества. Другие сведения по видам газов см. в разделе 9.2.

Вентиляционные отверстия, ведущие наружу вычислительного домена (OPEN), во время расчетов не могут открываться или закрываться. Подробнее см. раздел 11.4.2.

#### «MIRROR» VENT (зеркало)

VENT с SURF\_ID='MIRROR' обозначает плоскость симметрии. Обычно MIRROR охватывает всю грань вычислительного домена, естественным образом увеличивая размер домена вдвое, а MIRROR играет роль плоскости симметрии. Поток на противоположной стороне зеркала (MIRROR) в точности инвертирован. С численной точки зрения MIRROR – граница со свободным проскальзыванием с условием непротекания. Как и OPEN, MIRROR можно прописать только на внешней границе вычислительного домена. Часто OPEN или MIRROR VENTы прописываются вдоль всей стороны вычислительного домена, тогда удобно пользоваться записью “MB”.

Помните, что зеркальное изображение фрагмента в Smokeview не отображается.
--

### **7.3.2 Управление VENT**

Функциональность VENT в некоторых случаях может контролироваться «устройствами» и «элементами управления», заданными через DEVC\_ID или CTRL\_ID. См. раздел 11.4.2.

### **7.3.3 Устранение неполадок, связанных с VENT**

В отличие от большинства строк во входных файлах, порядок, в котором вы указываете VENTы, может иметь значение. Возможны ситуации, когда удобно один VENT расположить на другом. Например, предположим, вам нужно обозначить определенную совокупность свойств поверхности потолка пожарного отсека, и вы обозначаете, что весь потолок имеет соответствующий SURF\_ID. Потом вам нужно, чтобы на меньшем участке потолка были обозначены другие свойства поверхности, например, приточная вентиляция. В этом случае в первую очередь вам нужно задать подающий VENT, потому что для этого участка потолка FDS будет игнорировать свойства потолка и применять свойства канала подачи воздуха. FDS обрабатывает первый VENT, а не второй, как и было в предыдущих версиях. Сейчас правило для VENT такое: первого первым и обслуживают. Но все же помните, что второй VENT игнорируется не полностью, а только там, где они накладываются. FDS также выведет предупреждение на экран (или как стандартную ошибку) о том, какой VENT имеет приоритет.

Smokeview может помочь определить, где два VENT накладываются друг на друга, присваивая каждому свой COLOR (цвет). Из-за того, что Smokeview рисует VENTы один на другом, накладываются области будут иметь зернистую структуру, которая меняется при повороте сцены. В ситуациях, когда перекрытие нужно для удобства, можете слегка подкорректировать координаты предпочитаемого VENT так, чтобы он немного сместился с твердой поверхности. Сделайте смещение меньше одной десятой величины клетки, и FDS привяжет его к нужному месту. Затем, нажимая клавишу 'q', вы можете убрать зернистое перекрытие, показав VENT там, где вы его задали, а не там, куда его переместила FDS. Этот прием тоже работает при наложении граней двух препятствий.

Если возникает сообщение об ошибке с требованием задать ориентацию вентиляционного отверстия, сначала убедитесь, что канал представляет собой плоскость. Если он представляет собой плоскость, то координаты можно подтвердить, задав параметр IOR. Если нормаль к VENT лежит в положительном направлении x, задайте IOR=1. Если она в отрицательном направлении x, задайте IOR=-1. Для направлений y и z примените цифры 2 и 3 соответственно. Иногда настройка IOR может решить проблему, но вероятнее всего, если появляется сообщение об ошибке в ориентации, то причина в том, что VENT спрятан в твердом препятствии, и программа не может определить направление лицевой стороны VENT.

## Глава 8

### Граничные условия

В этой главе описывается задание свойств объектов, которые составляют граничные поверхности домена. **Эта самая сложная часть задания модели.** Почему? Во-первых, как при реальных, так и при моделируемых пожарах, развитие пожара очень чувствительно к тепловым свойствам окружающих материалов. Во-вторых, даже если все свойства окружающих материалов до некоторой степени известны, интересующее физическое явление может быть не правильно смоделировано из-за ограничений алгоритмов модели или из-за разрешения численной сетки. необходимо задать тепловые свойства веществ, а затем оценить эффективность модели, для того чтобы убедиться, что интересующее явление фиксируется

#### 8.1 Основы

По умолчанию внешняя граница вычислительного домена считается твердой поверхностью с температурой окружающей среды. То же самое можно сказать о любых препятствиях, которые добавлены к сцене. Для того чтобы задать свойства твердых тел, используйте группу SURF (См. часть 8.2). Начиная с 5 версии FDS, твердые тела предполагаются состоящими из слоев, которые могут быть выполнены из разных материалов. Свойства каждого материала задаются через группу MATL (см. 8.4). Эти свойства определяют, насколько быстро нагреваются материалы и как они горят. В каждом MATL во входном файле должен присутствовать параметр ID, чтобы они могли быть соотнесены с определенной группой SURF через параметр MATL\_ID. Например, следующие строки:

```
MATLID           = 'BRICK'  
  CONDUCTIVITY   = 0.69  
  SPECIFIC_HEAT  = 0.84  
  DENSITY        = 1600. /
```

```
&SURF ID         = 'BRICK WALL'  
  MATL_ID        = 'BRICK'  
  COLOR          = 'RED'  
  BACKING        = 'EXPOSED'  
  THICKNESS      = 0.20 /
```

```
&OBST           XB=0.1, 5.0, 1.0, 1.2, 0.0, 1.0, SURF_ID='BRICK WALL' /
```

определяют кирпичную стену длиной 4.9 м, высотой 1 м. и толщиной 20 см.

Указанная строкой OBST толщина стены не обязана совпадать с указанной строкой SURF. Толщина материала на поверхности стены задается параметром THICKNESS (толщина). Эти два параметра не связаны друг с другом, строка OBST задает общую геометрическую структуру, а SURF геометрические характеристики поверхностей, которые включает в себя толщину слоев материалов, примененная к той поверхности.

#### 8.2 Описание граничных поверхностей: Группа SURF (таблица 13.22)

SURF – это группа (Таблица 13.22), которая задает структуру твердых поверхностей или отверстий внутри или на границе домена. Граничные условия для препятствий и

вентиляционных отверстий задаются ссылкой на соответствующую строку(и), параметры которых описаны в этом разделе.

Используемое по умолчанию граничное условие для всех твердых поверхностей соответствует холодной инертной стене. Если необходимо только это граничное условие, тогда нет необходимости добавлять строки SURF к входному файлу.

Каждая строка SURF содержит строку идентификатора ID='...', позволяющую сослаться на нее препятствию или вентиляционному отверстию. Таким образом, в каждой строке OBST и VENT символьная строка SURF\_ID='...' отображает ID строки SURF, которая содержит необходимые параметры граничного условия. Если определенная строка SURF должна использоваться по умолчанию, например, CONCRETE задайте SURF\_DEFAULT='CONCRETE' в строке MISC.

Граничное условие 'INERT', используемое по умолчанию, учитывает тепловые потери, и не аналогично адиабатической поверхности. Для определения адиабатической поверхности задайте параметр ADIABATIC=.TRUE. в строке SURF.

### **8.2.1 Задание пожара с известной скоростью выделения тепла**

Твердые тела и жидкое топливо могут быть смоделированы заданием их соответствующих свойств через группу MATL. Однако если вы хотите описать пожар просто через скорость выделения тепла (HRR), не нужно задавать свойства материала. По сути, огонь моделируется как выделение газообразного топлива с твердой поверхности или вентиляционного отверстия. По существу это горелка с определенной скоростью выделения тепла на единицу площади, HRRPUA, с единицей измерения кВт/м<sup>2</sup>. Например:

```
&SURF      ID='FIRE',HRRPUA=500. /
```

500 кВт/м<sup>2</sup> применяется к любой поверхности с параметром SURF\_ID='FIRE'. Информацию об изменении скорости выделения тепла см. в разделе 8.5 «Условия, зависящие от времени».

Альтернативой HRRPUA является параметр MLRPUA. Он имеет схожие возможности, но определяет скорость потери массы с единицы площади (измеряется в кг/м<sup>2</sup>/с). Не задавайте оба параметра HRRPUA и MLRPUA в одной строке SURF. С любым из них стехиометрия реакции в газовой фазе задается параметрами строки REAC. Все виды веществ, связанных с процессом горения вычисляются через переменную доли в смеси и не должны быть точно заданы. Исключение из этого правила - не вступающий в реакцию газ, введенный в домен как разбавляющее вещество, например, CO<sub>2</sub> из огнетушителя или H<sub>2</sub>O из испаренных капель спринклера (См. раздел 9.2). Если требуется использовать модель конечной скорости горения, см. раздел 9.3.

При задании HRRPUA или MLRPUA автоматически запускается модель доли в смеси.

### **8.2.2 Простые тепловые граничные условия**

Обычно тепловые свойства твердой границы задаются через группу MATL, которая используется группой SURF через символьную строку MATL\_ID. Тем не менее, иногда удобно задать постоянную температуру на границе, и в этом случае задайте параметру TMP\_FRONT значение температуры поверхности в °C. Для твердой поверхности с постоянным конвективным тепловым потоком, задайте параметр CONVECTIVE\_HEAT\_FLUX (конвективный тепловой поток), в кВт/м<sup>2</sup>. Если параметр CONVECTIVE\_HEAT\_FLUX положительный, стена нагревает газы окружающей среды. Если параметр CONVECTIVE\_HEAT\_FLUX отрицательный, стена охлаждает газы

окружающей среды. Лучистый тепловой поток может быть задан только обоими параметрами TMP\_FRONT и EMISSIVITY.

Постоянную температуру или постоянный тепловой поток легко задать, но их применимость в реальных сценариях пожара ограничена. В большинстве случаев стены, потолки и полы состоят из нескольких слоев облицовочного материала.

Предполагается, что самый внутренний слой может накладываться на воздушный зазор с температурой окружающей среды (как лист гипсокартона, закрепленный на деревянной стойке) или на изолируемый материал и в этом случае тепловых потерь в материал нет; или может накладываться на комнату с другой стороны стены. По умолчанию, облицовочный материал стены накладывается на воздушный зазор (BACKING='VOID'). Если облицовочный материал накладывается на изолируемый материал как, например, стальной лист, закрепленный на изолирующем листе ДВП, выражение BACKING='INSULATED' в строке SURF предотвращает потерю тепла с задней стороны материала.

В заключение, если требуется, чтобы тепло проходило через стену в пространство за стеной, параметр BACKING='EXPOSED' должен быть внесен в список. Эта функция действует только, если стена меньше или равна одной ячейки сетки, и если есть ненулевой объем вычислительного домена с другой стороны стены. Безусловно, если стена - внешняя граница домена, то тепло уходит в пустоту.

Для специального использования часто требуется, чтобы твердая поверхность была адиабатической, то есть, нет полезной теплопередачи (лучистой и конвективной) от газа к твердому телу. Для этого в строке SURF нужно задать параметр ADIABATIC=.TRUE. и ничего больше. FDS вычислит температуру стены так, чтобы сумма конвективного и лучистого потоков равнялась нулю.

### **8.2.3 Вентиляторы и другие граничные условия скорости**

В большинстве случаев в вентиляционной системе здания, которая описана в FDS, применяются граничные условия скорости. Например, можно направить чистый воздух в помещение, и удалить дым из помещения, задав скорость на твердой поверхности в направлении нормали. Однако ниже описываются другие различные аспекты граничных условий скорости.

#### **Приточная и вытяжная вентиляция**

Самый простой способ описания приточного или вытяжного вентилятора – это создать VENT (вентиляционное отверстие) на твердой поверхности с помощью SURF\_ID, определив скорость или объемный расход. Нормальная составляющая скорости обычно прямо задается через параметр VEL. Если VEL отрицательное, то поток направляется в вычислительный домен, т.е. в приточное вентиляционное отверстие. Если VEL положительное, поток удаляется из домена, т.е. в вытяжное вентиляционное отверстие. Например, строки:

```
&SURF ID='LOUVER', VOLUME_FLUX=-5.0, VEL_T=2.0,-1.0, COLOR='GREEN' / &OBST  
XB=..., SURF_ID6='BRICK','LOUVER','BRICK','BRICK','BRICK','BRICK' /
```

предписывают, что передняя x- лицевая поверхность препятствия должна иметь скорость равную 5 м<sup>3</sup>/сек., разделенная зоной грани (приблизительно как в FDS), которая поступает в вычислительный домен.

Имейте в виду, что нельзя задавать оба параметра VEL и VOLUME\_FLUX одновременно. Выбирать нужно в зависимости оттого, нужна ли в данном вентиляционном отверстии определенная скорость или определенный расход.

#### **Нагреватели**

Можно создать простую систему отопления, изменив температуру приточного воздуха.

Вентиляционное отверстие с SURF\_ID='BLOWER' будет пропускать в домен воздух 50 °С при скорости ½ метров в секунду. При положительной скорости воздух будет высасываться, в этом случае TMP\_FRONT будет не нужен.

Имейте в виду, что если заданы HRRPUA или параметры реакции твердой фазы, то не нужно указывать скорость. Горючие газы выпускаются с расчетной скоростью.

### **Общий массовый расход**

Чаще всего указываются простые приточные или вытяжные отверстия, заданием либо нормальной скорости, либо объемный расход на твердой поверхности. Однако контролировать массовый расход (кг/сек) в отличие от объемного (м<sup>3</sup>/сек) можно через параметр MASS\_FLUX\_TOTAL (общий массовый расход). В MASS\_FLUX\_TOTAL применяется же самое правило знаков как в VEL (скорости). Фактически введенное значение для MASS\_FLUX\_TOTAL внутренне преобразовывается в граничное условие скорости, значение для которой задается на основе локальной плотности.

### **Граничные условия тангенциальной скорости**

Когда газ обтекает твердое препятствие, он «налипает» на поверхность и образует граничный слой. Теоретически, скорость газа на поверхности нулевая и она резко увеличивается в пограничном слое, толщина которого несколько миллиметров в значении «свободного потока». В большинстве прикладных расчетов невозможно впрямую смоделировать этот граничный слой, таким образом, для представления эффекта на общем поле течения применяется эмпирическая модель. При вычислении LES (по умолчанию) скорость на стене задается как доля значения в ячейке, прилегающей к стене. Только при DNS (Прямое Численное Моделирование) вычисление является скоростью на стене, фактически заданная на ноль. Чтобы изменить эти значения по умолчанию нужно задать параметр SLIP\_FACTOR (коэффициент скольжения). Этот параметр колеблется от -1 до 1. Если необходима стена без проскальзывания, задайте параметр SLIP\_FACTOR=-1, а для стены со свободным проскальзыванием задайте SLIP\_FACTOR=1. Числа от -1 до 1 могут представлять частичные условия проскальзывания, которые могут подойти для моделирований, включая большие ячейки сетки. Значение по умолчанию SLIP\_FACTOR (коэффициента скольжения) 0.5 для LES, для DNS -1.0

Не рекомендуется изменять граничное условие скорости по умолчанию, если вас не интересует результат на полном потоке. Иногда задают различные степени неровности поверхности через SLIP\_FACTOR. Однако это нужно выполнять осторожно, используя результат анализа или эмпирическую связь.

### **Решетчатые вентиляционные отверстия**

Большинство реальных вентиляционных отверстий покрыты решетками, которые перенаправляют или рассеивают поступающий поток воздуха. В некоторой степени, это действие можно воспроизвести, задав как нормальную, так и тангенциальную составляющие потока. Нормальная составляющая потока задается параметром VEL как описано выше.

Тангенциальная скорость задается парой действительных чисел VEL\_T, где представлены необходимые компоненты тангенциальной скорости в других двух координатных направлениях (x или y записываются раньше y или z). Например, строки  
&SURF ID='LOUVER', VEL=-1.2, VEL\_T=0.5,-0.3 /

являются граничным условием для решетчатого вентиляционного отверстия, которое проталкивает воздух в пространство с нормальной скоростью 1.2 м/с и тангенциальной скоростью 0.5 м/с в x либо в y направлении и -0.3 м/с в y либо z направлении, в зависимости от направления нормали.

В случае ограниченной разрешающей способности, невозможно будет задать решетчатое вентиляционное отверстие или щелевой диффузор с помощью VENT\_T, так как может быть не достаточно ячеек сетки, которые охватывают отверстие. В этих случаях можно было просто задать заграждение из плоской пластины перед VENT со сдвигом в одну ячейку сетки. Панель просто перенаправит поток воздуха во все боковые направления.

### **Бесканальные вентиляторы**

Вентиляторы не обязаны быть установлены на твердой поверхности как приточный или вытяжной вентилятор. Если необходимо просто прогнать газы в определенном направлении, создайте тонкое (ноль ячеек толщиной) заграждение и примените к нему через SURF\_ID строку SURF, где есть параметр POROUS=.TRUE. вместе с другими параметрами скорости. Это позволит пропустить горячие, дымовые газы через заграждение как свободностоящий вентилятор. По необходимости эти препятствия просто плоские плиты. В зависимости от знаков, скорость VEL связанная с поверхностью POROUS предназначается для обозначения скорости в положительном или отрицательном координатном направлении.

Можно также создать стенку вокруг вентилятора с помощью четырех плоских плит расположенные для создания короткого канала, который впускает газы в одну часть и удаляет в другую. Плита, которая представляет собой вентилятор, может быть расположена посередине вдоль канала.

### **Кривая вентилятора**

В выше указанных стратегиях для задания разных частей вентиляционной системы не рассмотрены факты, что на существующие вентиляционные системы зависят от изменения давления между помещениями. Этот абзац был взят из Главы 8.3.2.

#### **8.2.4 Виды веществ и граничные условия для этих веществ**

Существует два вида граничных условий для веществ (для дополнительной информации по заданию и использованию видов веществ смотрите главу 9.2). Эти граничные условия - MASS\_FLUX (N) (массовый расход) и MASS\_FRACTION (массовая доля) (N) где N ссылается на вещества по их расположению во входном файле. Например, второй перечисленный вид вещества это N=2. Если требуется простое условие расхода на сплошной стене, ничего не задавайте. Если массовый расход вида вещества N должен быть значением на вынужденной границе потока (VEL или MASS\_FLUX\_TOTAL), задайте в надлежащей строке SURF параметр MASS\_FRACTION(N), который соответствует требуемой массовой доли. Если требуется массовый расход вида вещества N, задайте параметр MASS\_FLUX (N) вместо параметра MASS\_FRACTION (N). Если задан параметр MASS\_FLUX (N) не следует задавать VEL. Она автоматически вычисляется на основе массового расхода. Входные параметры MASS\_FLUX (N) (и обычно MASS\_FRACTION (N)) должны быть использованы только при граничных условиях. MASS\_FLUX (N) должен быть положительным, выраженным в кг/м<sup>2</sup>/сек.

Имейте в виду что, определяя MASS\_FRACTION (N), вы задаете «мнимое значение» значений ячейки для выделений массового расхода. Поскольку уравнение сохранения массы является адвективно-диффузионным уравнением, если заданная скорость небольшая, тогда продолжительность диффузии может превосходить в получении непреднамеренного массового расхода видов вещества. Для того чтобы получить гарантированную массовую долю видов веществ, необходимо использовать MASS\_FLUX(N).

#### **8.2.5 Дополнительный вопрос: Пожары и потоки вне помещений**

Моделирование пожара вне помещений не слишком отличается от пожара в помещениях, но есть малоизученные области, которые должны быть рассмотрены. Во-первых, скорость профиля ветра на любой внешней границе по умолчанию будет цилиндрической



(постоянной), но параметр PROFILE в строке SURF может определять и другие профили. Например, PROFILE='PARABOLIC' задает параболический профиль с помощью VEL, максимальной скорости, а 'ATMOSPHERIC' задает обычный профиль атмосферного ветра формулы  $u=u_0(z/z_0)^p$ . Если задается профиль атмосферы, задайте также Z0 для z0 и PLE для p. VEL задает исходную скорость  $u_0$ .

Имейте в виду, что z0 это не земля, а скорее некая высота, где измеряется скорость ветра как на высокой метеостанции. Считается, что земля расположена на z=0. Чтобы поменять это предположение задайте GROUND\_LEVEL в строке MISC, чтобы соответствовать значению z. Внимание: не применяйте атмосферный профиль скоростей ниже GROUND\_LEVEL, иначе FDS остановится из-за ошибки.

Другим полезным параметром для моделирования вне помещения является скорость падения температуры воздуха. Обычно в первые несколько сотни метров атмосферы, температура снижается на несколько градусов по Цельсию в километр. Эти несколько градусов важны при рассмотрении распространения дыма, так как температура дыма резко понижается при подъеме. Параметр LAPSE\_RATE (вертикальный градиент) атмосферы может быть задан в строке MISC в единицах измерения  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ . Отрицательный знак обозначает, что температура снижается с высотой. Это необходимо только для задания расчета вне помещения, где высота домена десятки или сотни метров. Значение по умолчанию LAPSE\_RATE (вертикального градиента) -  $0^{\circ}\text{C}/\text{м}$ .

По умолчанию подразумевается, что в FDS плотность и давление снижаются с высотой, вне зависимости от задачи расчета и размера домена. В большинстве моделированиях, это действие не значительное, но его можно полностью отключить, задав STRATIFICATION=.FALSE в строке MISC.

### **8.2.6 Дополнительный вопрос: Радиальное распространение огня**

Иногда необходимо, чтобы пожар распространялся радиально с какой-то заданной скоростью. Вместо того чтобы пытаться разработать свойства материала для выполнения этого действия, можно использовать VENT особым способом. Если SURF\_ID связан с VENT, который определяет заданную скорость выделения тепла HRRPUA и изменение во времени RAMP\_Q или TAU\_Q, вы можете также задать XYZ и SPREAD\_RATE в строке VENT. Тогда пожар возникает в точке XYZ, и распространяется радиально со скоростью SPREAD\_RATE (м/с). Постепенное повышение начинается в то время, когда пожар достигает данной точки. Например, строки:

```
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=500.0, RAMP_Q='fireramp' /
&RAMP ID='fireramp', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='fireramp', T= 1.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fireramp', T=30.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fireramp', T=31.0, F=0.0 /
&VENT XB=0.0,5.0,1.5,9.5,0.0,0.0, SURF_ID='FIRE', XYZ=1.5,4.0,0.0,
SPREAD_RATE=0.03 /
```

образуют прямоугольный участок при z=0 в котором возникает пожар в точке (1.5,4.0,0.0) и распространяется со скоростью 0.03 м/с. Каждая ячейка поверхности горит 30 секунд, так как пожар распространяется снаружи, образуя расширяющееся пожарное кольцо. Имейте в виду, что RAMP\_Q используется в этой структуре, чтобы включать и отключать огонь для моделирования расхода топлива, тогда как пожар распространяется радиально. Этот параметр не должен быть использован для воспроизведения квадратичного пожара. Вся цель данной задачи - это моделирование более естественным образом. В итоге огонь угасает, так как увеличение кольца проходит границу прямоугольника. Параметр SPREAD\_RATE, который приводит к требуемому изменению во времени скорости выделения тепла определяется методом проб и ошибок.

### 8.2.7 *Дополнительный вопрос: неплоские стены и объекты*

Предполагается, что все препятствия в FDS соответствуют прямолинейной сетке, а все граничные поверхности должны быть плоскими панелями. Однако, многие предметы как кабели, трубы, каналы не являются плоской поверхностью. Несмотря на то, что эти предметы должны будут представлены в FDS в виде «ящиков», вы можете по-прежнему выполнять расчет внутренней теплопередачи, как если бы предметы действительно были цилиндрическими или шаровидными. Например, строки ввода:

```
&OBST XB=0.0,5.0,1.1,1.2,3.4,3.5, SURF_ID='CABLE' /  
&SURF ID='CABLE', MATL_ID='PVC', GEOMETRY='CYLINDRICAL', THICKNESS=0.01 /
```

могут быть использованы для моделирования кабеля питания длиной 5 метров с цилиндрическим сечением и диаметром 2 см. Вычисление теплопередачи все еще остается одномерным; то есть предполагается, что вокруг всех предметов одинаковый тепловой поток. Это может привести в замешательство, потому что кабель представлен как препятствие квадратного поперечного сечения с отдельным вычислением теплопередачи, выполненным на каждой грани, и между этими четырьмя гранями нет связи. Очевидно, это не подходящий способ расчета теплопередачи твердой фазы, но он обеспечивает соответствующую температуру граничной поверхности для вычисления газовой фазы. Для подробного анализа кабеля потребуется двух или трехмерный расчет теплопроводности, который не реализован в FDS. Чтобы описать предметы сферической формы используйте `GEOMETRY='SPHERICAL'`.

### 8.3 **Эффекты, связанные с давлением: Группа ZONE (Таблица 13.26)**

Основная система уравнения FDS подразумевает, что давление должно быть составлено из «фоновой» компоненты  $\bar{p}(z, t)$  и малого возмущения  $\tilde{p}(x, t)$ . Очень часто  $\bar{p}$  - это только гидростатическое давление, а  $\tilde{p}$  - возбуждаемое потоками поле давлений, которое вычисляет FDS на каждом шаге по времени. Изначально (FDS v. 1-4) можно было создать однокамерное, герметичное помещение, стены которого соответствовали внешней части вычислительного домена. Огонь или вентилятор могли повысить (понижить) фоновое давление в однокамерном помещении, а площадь утечки могла быть задана между помещением и окружающей средой. Поток, который прошел через «трещины» это просто функция фонового давления по обычному эмпирическому правилу. Эта идея была обобщена, начиная с 5 версии FDS. Теперь вы можете задавать любое число герметичных помещений в вычислительном домене с их собственным фоновым давлением, и эти зоны могут быть соединены с помощью утечек и каналов.

Существует несколько ограничений для определения зон давления. Во-первых, зоны давления должны быть полностью окружены препятствиями (достаточно внешней границы). Во-вторых, препятствия не должны исчезать во время расчета. Другими словами, дверь или окно не должны открываться (кроме того, не должно быть OPEN (открытых) вентиляционных отверстий, если одна граница между зонами является внешней границей вычислительного домена). В-третьих, зоны давления могут охватить составные сетки, но проверяйте давление в каждой сетке, чтобы убедиться в правильности.

#### 8.3.1 *Утечки*

Объем потока  $\dot{V}$  через площадь утечки  $A_L$  определяется формулой:

$$\dot{V}_{leak} = A_L \text{sign}(\Delta p) \sqrt{2 \frac{|\Delta p|}{\rho^\infty}} \quad (8.1)$$

где  $\Delta p$  - разность давлений между соседними помещениями (в паскалях), а  $\rho_\infty$  - плотность окружающей среды (в  $\text{кг/м}^3$ ). Коэффициент расхода в этой типовой формуле предполагается. По существу утечка - это явление подсеточного масштаба, так как зона утечки обычно очень маленькая. Другими словами невозможно прямо определить утечку в численной сетке. Иногда можно «полностью собрать» утечку в одну решаемую ячейку отверстия, но это трудно по двум причинам. Во-первых, зона утечки редко четко соответствует размеру одной ячейки клетки. Во-вторых, скорости потока в щели могут быть большими и вызывают неустойчивость численного решения.

Самый лучший способ для регулирования утечки - это использование зоны давления. Зона давления - это заданная пользователем величина внутри вычислительного домена, то есть полностью окруженная твердыми заграждениями. Например, во внутренней части закрытой комнаты может быть и должна быть описана зона давления. Утечка из одного помещения в другое обозначается затем в строках ввода, которые определяют отдельные зоны давления:

```
&ZONEXB=0.3,1.2,0.4,2.9,0.3,4.5,LEAK_AREA(0)=0.0001 /
&ZONE XB=2.3,5.8,1.4,2.9,6.8,9.7, LEAK_AREA(1)=0.0002 /
```

Первая строка обозначает зону вычислительного домена, которая должна быть «Зона Давления» 1. По умолчанию Зона 0 - давление окружающей среды. В этом примере, утечка происходит между Зоной 1 и внешней части Зоны 0, и площадью утечки  $0.0001\text{м}^2$  (например 1 см. на 1 см. щели). Утечка из Зоны 2 в Зону 1 (и наоборот) с площадью утечки  $0.0002\text{м}^2$ . По крайней мере одно из заграждений, которое образует стены Зоны 1 должно иметь параметр LEAK\_PATH=1,0 обозначающий, что утечка между Зонами 1 и 0 равномерно распределяется по твердым телам, заданные параметром:

```
&SURF ID=' whatever',..., LEAK_PATH=1,0 /
```

Точно также препятствия Зоны 1 и Зоны 2 должны включать в себя твердые тела свойства SURF (поверхностей), которых включают параметр LEAK\_PATH (путь утечки)=1,2. Это говорит о том, что FDS полностью собирает все утечки по всем поверхностям. Последовательность зон давления определяется LEAK\_PATH (путем утечки), который является незначительным.

### 8.3.2 Вентиляторы

В разделе 8.2 рассматривается скорость граничных условий, в которой вентилятор смоделирован просто как граница твердого тела, который пропускает или всасывает воздух, не смотря на окружающее поле давления. На самом деле, вентиляторы работают на основе скачка давления через канал или трубопровод, который заранее задан. задается очень простая «кривая вентилятора»:

$$\dot{V} fan = A_{duct} U_{max} sign(\Delta p_{max} - \Delta p) \sqrt{\frac{\Delta p - \Delta p_{max}}{\Delta p_{max}}} \quad (8.2)$$

где  $A_{duc}$  - площадь канала ( $\text{м}^2$ )  $U_{max}$  - скорость воздуха ( $\text{м/сек}$ ) и  $\Delta p_{max}$  - максимальная разность давления при которой может работать вентилятор. На рисунке 8.1 показана обычная кривая вентилятора.

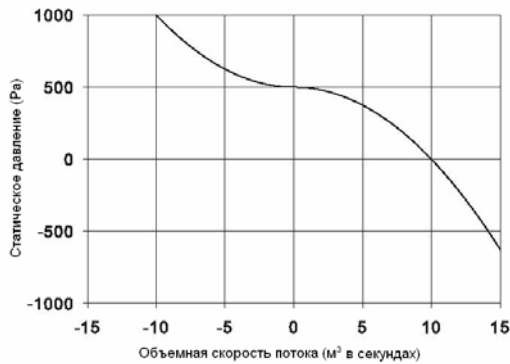


Рис. 8.1 **Кривая вентилятора соответствует** параметрам VOLUME\_FLUX (массовый поток) =10 и MASS\_PRESSURE (массовое давление) =500.

Идеальная скорость вентилятора  $U_{\max}$  задается через параметр VEL в соответствующей строке SURF. Альтернативно объемный расход  $A_{\text{duct}} U_{\max}$  может быть задан параметром VOLUME\_FLUX, но нельзя использовать оба параметра. Эти параметры уже описывались в Разделе 8.2. Для того чтобы моделировать работу конкретного вентилятора, необходимо задать несколько дополнительных параметров. Чтобы задать  $\Delta p_{\max}$ , максимальное рабочее избыточное давление, добавьте MAX\_PRESSURE. Имейте в виду, что MAX\_PRESSURE (макс. давление) всегда должен быть положительным и в паскалях. Если при моделировании, вычисленное давление превышает заданного MAX\_PRESSURE (макс. давления), то в канале произойдет обратный поток.

Ниже приводится пример задания вентилятора. В руководстве V&V дается реальный пример (fan\_test). В нем, два простых помещения разделены общей стеной. Оба помещения подразумевались как отдельные «зоны давления». Два вентилятора установлены в несущей стене, которые пропускают воздух в обратных направлениях.

```
&SURF ID='BLOW LEFT', POROUS=.TRUE., VEL=-0.2, DUCT_PATH=1,2,
MAX_PRESSURE=1000. /
&SURF ID='BLOW RIGHT', POROUS=.TRUE., VEL= 0.4, DUCT_PATH=2,1,
MAX_PRESSURE=1000. /
```

```
&ZONE XB=-3.0, 0.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Pressure Zone 1
&ZONE XB= 0.0, 3.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Pressure Zone 2
```

```
&OBST XB= 0.0, 0.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Partition Wall
```

```
&HOLE XB=-0.1, 0.1,-0.1, 0.1, 0.4, 0.6 /
&OBST XB= 0.0, 0.0,-0.1, 0.1, 0.4, 0.6, ..., SURF_ID='BLOW RIGHT',
PERMIT_HOLE=.FALSE. /
```

```
&HOLE XB=-0.1, 0.1,-0.1, 0.1, 1.4, 1.6 /
&OBST XB= 0.0, 0.0,-0.1, 0.1, 1.4, 1.6, ..., SURF_ID='BLOW LEFT', PERMIT_HOLE=.FALSE.
/
```

Рассмотрим некоторые дополнительные параметры. Параметр POROUS=.TRUE. позволяет пропустить через заграждения горячие дымовые газы, которые выпускают вентиляторы. По необходимости эти препятствия просто плоские плиты. В зависимости от знаков, скорость VEL связанная с поверхностью POROUS предназначалась для обозначения скорости в положительном или отрицательном координатном направлении. Это отличается от того правила, которое применялось, когда в строке SURF задавали сплошную стену.

Соответственно DUCT\_PATH определяет ZONE (зону) входного и выходного давления вентилятора. Например, вентилятор параметром ID='BLOW LEFT', пропускает воздух из ZONE 1 в ZONE 2. При более сложных сценариях, можно подключить вентилятор в отдельных помещениях, где подразумевается, что «действующий» канал объединяет две зоны. HOLES (щели) в перегородке служат только, чтобы выделить зоны для заграждений, которые представляют собой вентиляторы. Имейте в виду, что у препятствий нулевая толщина в соответствии с поверхностью POROUS. PERMIT\_HOLE=.FALSE. информирует FDS не отклонять препятствия, так как они включены в перегородку.

#### 8.4 Описание действительных материалов: Группа MATL

Граница твердого тела может состоять из разных многослойных материалов, и каждый слой может содержать составные компоненты материала. Такие сочетания слоев и компонент материалов задаются через массив MATL\_ID(IL,IC) в строке SURF. параметр IL - это целое число, обозначающее индекс слоя, который начинается с цифры 1, слой на внешней границе. параметр IC - это целое число, обозначающее индекс компонента. Например, MATL\_ID(2,3)='BRICK' обозначает, что третий компонент материала второго слоя - BRICK (кирпич). Фактически, материалы часто перечисляются, как показано в примере:

```
&MATL      ID='INSULATOR'
           CONDUCTIVITY=0.041
           SPECIFIC_HEAT = .09
           DENSITY= 229. /
&SURF      ID='BRICK WALL'
           MATL_ID = 'BRICK','INSULATOR'
           COLOR = 'RED'
           BACKING = 'EXPOSED'
           THICKNESS = 0.20,0.10 /
```

Без действительного параметра, параметр MATL\_ID должен быть списком материалов в составных слоях, где каждый материал состоит только из одного компонента.

Имейте в виду, что в этом примере BRICK WALL (кирпичная стена) не симметрична. Будьте внимательны при использовании строки SURF к целому препятствию, так как параметр EXPOSED обозначает, что задняя поверхность препятствия отличается от передней.

Максимальное количество слоев материала 20, а компонентов материала 20.

Смеси твердых материалов в одном слое могут быть заданы ключевым словом MATL\_MASS\_FRACTION. У этого параметра также есть 2 индекса как у ключевого слова MATL\_ID. Например, если в кирпичном слое содержится добавочная вода, вход будет следующим образом:

```
&MATL ID      = 'WATER'
           CONDUCTIVITY      = 0.60
           SPECIFIC_HEAT     = 4.19 DENSITY 1000. /
&SURF ID      = 'BRICK WALL'
           MATL_ID(1,1:2)    = 'BRICK','WATER'
           MATL_MASS_FRACTION(1,1:2) = 0.95,0.05
           MATL_ID(2,1)      = 'INSULATOR'
           COLOR              = 'RED'
           BACKING            = 'EXPOSED'
```

THICKNESS

= 0.20,0.10 / <---for layers 1 and 2

В данном примере первый слой материала Слой 1 состоит из кирпича и воды. Он задается массивом MATL\_ID, определяющий Компонент 1 Слая 1, который должен быть кирпичом, а Компонент 2 Слая 1 должен быть водой. Массовая доля каждого задается через MATL\_MASS\_FRACTION. В этом случае, кирпич составляет 95% массой Слая 1, а вода 5%.

Важно обратить внимание на то, что компоненты твердых смесей рассматриваются как чистые вещества без пустот. Плотность состава:

$$p = \left( \sum_i \frac{Y_i}{P_i} \right) \quad (8.3)$$

где  $Y_i$  - массовая доля материала, а  $P_i$  - плотность материала, заданная в строке MATL. В вышеприведенном примере результирующая плотность стены будет  $1553 \text{ кг/м}^3$ . Факт, что плотность стены меньше чем плотность чистого кирпича может привести в замешательство, но это можно легко объяснить. Если в стене содержится вода, полная масса стены не может быть из чистого кирпича. Вместо этого будут пустоты (щели), которые будут заполнены водой. Если удалить воду, то останется  $1476 \text{ кг/м}^3$  кирпича. Чтобы получить плотность  $1600 \text{ кг/м}^3$  для частично пустой стены, должна быть использована повышенная плотность для чистого кирпича.

#### 8.4.1 Тепловые свойства

Для любого твердого вещества, задайте CONDUCTIVITY (удельную теплопроводность) (Вт/мК), DENSITY (плотность) ( $\text{кг/м}^3$ ), SPECIFIC\_HEAT (удельная теплоемкость) (кДж/кг/Кбит), и EMISSIVITY (коэффициент черноты) (по умолчанию 0.9). Оба параметра CONDUCTIVITY и SPECIFIC\_HEAT могут быть функциями температуры, а параметры DENSITY и EMISSIVITY не могут быть. Температурная зависимость задается правилом RAMP. Как пример, рассмотрите негорючий стеновой материал Marinate, который подходит для применения при высокой температуре.

```
&MATL ID = 'MARINITE'  
    EMISSIVITY = 0.8  
    DENSITY = 737.  
    SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_ramp'  
    CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_ramp' /
```

```
&RAMP ID='k_ramp', T= 24., F=0.13 /  
&RAMP ID='k_ramp', T=149., F=0.12 /  
&RAMP ID='k_ramp', T=538., F=0.12 /  
&RAMP ID='c_ramp', T= 93., F=1.172 /  
&RAMP ID='c_ramp', T=205., F=1.255 /  
&RAMP ID='c_ramp', T=316., F=1.339 /  
&RAMP ID='c_ramp', T=425., F=1.423 /
```

Имейте в виду, что при температурно-зависимых значениях, RAMP параметр T обозначает температуру, а F – значение теплоемкости либо удельной теплопроводности. В данном случае ни CONDUCTIVITY (удельная теплопроводность), и ни SPECIFIC\_HEAT(теплоемкость) не даются в строке MATL, кроме названий RAMP.

До разработки FDS5, поглощение теплоизлучения из газового пространства всегда происходило на поверхности твердого материала, и излучение в газовое пространство проходило на поверхности. Начиная с FDS 5, твердому материалу можно задавать

ABSORPTION\_COEFFICIENT (Коэффициент поглощения) (1/м), который позволяет излучению проникать и поглощаться твердым телом. Соответственно, излучение материала основывается на внутренней температуре, не только на поверхности.

#### 8.4.2 Модели пиролиза

В FDS дается несколько способов описания пиролиза твердых тел и жидкостей. Выбор способа в значительной степени зависит от свойств материала и совместимости выделяемой модели пиролиза. В этом разделе дается описание входных параметров, начиная с обычного твердого тела.

##### Твердое топливо

Твердое тело может состоять из нескольких слоев, каждый из которых может состоять из нескольких компонентов. Твердый предмет описывается строкой SURF, где содержатся названия разных MATL (материалов). Каждый MATL может вступать в несколько реакций, которые могут происходить при разных температурах и поглощать разное количество тепла. При каждой отдельной реакции могут возникать (один) RESIDUE (твердый остаток), водяные пары, и/или топливный газ. Например, испарение воды из твердого материала описывается «реакцией», которая преобразовывает жидкую воду в водяные пары. Эта реакция происходит при 100 °C и производит только водяные пары. При такой реакции не возникает твердого RESIDUE (остаток), а также топливного газа. Однако пиролиз твердого тела может быть реакцией, при которой производится твердый RESIDUE (остаток), водяные пары и топливные газы.

При каждом вводе группы MATL во входном файле, решите, в какое количество реакций, она может вступить. Она может не вступать в реакцию вообще, а может только нагреться. Однако для изменения ее формы через одну или более реакции, задайте количество реакции целым числом N\_REACTIONS. Очень важно чтобы вы задали N\_REACTIONS, в противном случае FDS проигнорирует все параметры, связанные с реакцией. Имейте в виду, что очень часто эмпирически наблюдаемые сложные реакции не содержатся N\_REACTIONS >1, но она выполняется тем, что проверенный пример является смесью сложных материалов, которая входит в реакцию при различных температурах. В настоящее время максимальное количество реакции для каждого материала 10, а цепь последовательных реакции может содержать до 20 ступней.

Затем решите, что возникает при каждой реакции: (один) твердый RESIDUE (остаток), водяные пары и /или топливный газ. Эти данные соответственно передаются в FDS через значения NU\_RESIDUE (j), NU\_WATER (j), и NU\_FUEL (j). В данном случае j обозначает, к какой реакции параметр относится. В случае если возникают только водяные пары (например, при испарении воды), задайте NU\_WATER(j)=1.0, а другим двум параметрам задать значение ноль. По умолчанию все значения нулевые. Если значение NU\_RESIDUE(j) не нулевое, то вы должны определить, какой твердый остаток при RESIDUE(j), ID (идентификатор) другого MATL (материала), который также включается в список во входном файле. Теоретически сумма значений должна равняться 1, обозначая, что масса реагента сохраняется. Однако бывают ситуации, когда удобно чтобы величина значений была немного меньше чем 1. Например, разрушение или удаление бетона может быть описано как «реакция», которая потребляет энергию, но «продукции» не производит, так как от поверхности бетона откалываются куски и растрескиваются в пыль. Масса бетона в модели не сохраняется, так как она исчезает из определенной поверхности.

Теперь вы должны определить, при какой температуре и насколько быстро протекает реакция. Скорость реакции при температуре  $T_s$ , i-го материала (т.е. MATL, который теперь описываете) вступает в j-ю реакцию следующим образом:

$$r_{ij} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Ps,i}{Ps0} \right) = \left( \frac{Ps,i}{Ps0} \right)^{n_{s,ij}} A_{ij} \exp \left( -\frac{E_{ij}}{RT_s} \right) \max [0, Ts - T_{thr,ij}]^{n_{t,ij}} \quad (8,4)$$

$Ps,i$  – это плотность  $i$ -го материала в определенном слое, подразумевая, что масса материала, распределена по объему слоя.

$Ps0$  – исходная плотность слоя. Таким образом,  $Ps,i/Ps0$  – величина, которая повышается, если  $i$ -ый материал возникает как остаток других реакций и понижается, если  $i$ -ый материал разлагается. Если слой состоит только из одного материала и если в реакции не возникает твердый остаток, то  $ps,i/ps0$  всегда 1.

$n_{s,ij}$  – это порядок реакции, задается под именем  $N\_S(j)$  и по умолчанию равен 1. Если значение  $n_s$  неизвестно, то хорошее начальное приближение  $n_s=1$ .

Предэкспонента  $A_{ij}$  задается под именем  $A(J)$  в единицах измерения 1/сек.  $E_{ij}$  – энергия активации задается через  $E(J)$  в кДж/мольК. Помните, что 1 ккал равняется 4.184 кДж, и будьте осторожны с показателем 1000.  $A$  и  $E$  – не совсем подходит для многих действительных материалов. Однако если они известны, задайте оба. Не задавайте только одно, так как они функционируют вместе. Если  $A$  и  $E$  не известны, как обычно это бывает, задайте REFERENCE\_RATE (реперную скорость) (1/сек.) и REFERENCE\_TEMPERATURE (реперную температуру) (°C). Это направит FDS выбрать  $A$  and  $E$  с тем, чтобы скорость реакции REFERENCE\_RATE достигалась при REFERENCE\_TEMPERATURE. Значение по умолчанию REFERENCE\_RATE равняется  $0.1s^{-1}$ . Пока у вас нет информации, утверждающей обратное, предлагается оставить REFERENCE\_RATE (реперную скорость) в значении по умолчанию и просто задать REFERENCE\_TEMPERATURE (реперную температуру). Имейте в виду, что REFERENCE\_TEMPERATURE не соответствует температуре возгорания.

Точнее, это просто температура, при которой массовая доля  $i$ -того материала уменьшается со скоростью  $0.1 \text{ сек.}^{-1}$ .

Необходимо проверить разрешающую способность этих параметров, следуя методу выполнения, который дан в разделе 18.1.

$T_{thr,ij}$  – это дополнительная «пороговая» температура, которая определяет функцию, отличную от функции Аррениуса, условие возгорания, и задается параметром THRESHOLD\_TEMPERATURE (пороговая температура) (J). По умолчанию  $T_{thr,ij}$  -273.15 градусов по Цельсию,  $n_{t,j} = 0$ ; таким образом, последний член уравнения 8.4 не влияет на скорость пиролиза. Этот член может быть использован для описания пороговой температуры для реакции пиролиза, задавая  $T_{thr,ij}$  и  $n_{t,j} = 0$ . Член равен 0 при температуре ниже  $T_{thr,ij}$  и 1 при температуре выше.  $n_{t,j}$  задается под именем  $N\_T(J)$ .

Помните, что все температуры задаются в градусах Цельсия, а затем в программе преобразовываются в Кельвины. Таким образом, формула в этом разделе должна быть представлена в значении абсолютной температуры.

Последний результат перед примерами является самым важным среди всех. В уравнении (8.4) описывается скорость реакции как функция температуры. Во многих реакциях твердой фазы требуется энергия, то есть они являются эндотермическими. Величина израсходованной энергии на единицу массы реагента, который преобразовывается во что-то еще, задается HEAT\_OF\_REACTION(J) (теплотой реакции). Технически это – разность энтальпии между продуктами и реагентом. Положительное значение показывает, что реакция эндотермическая; то есть в реакции тепло передается из системы. Обычно HEAT\_OF\_REACTION (теплота реакции) точно известна только для реакций простого изменения фазы, например, при испарении воды. Для других реакции она должна быть установлена на основе опыта.

Ниже приведен пример материала, который горит при температуре  $350^\circ\text{C}$ , превращая всю его массу в топливные газы ( $NU\_FUEL=1$ ).



```

&MATL ID = 'My Fuel'
  FYI = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT = 1.0
  CONDUCTIVITY = 0.1
  DENSITY = 100.0
  HEAT_OF_COMBUSTION = 15000.
  N_REACTIONS = 1
  NU_FUEL(1) = 1.
  REFERENCE_TEMPERATURE(1) = 350.
  HEAT_OF_REACTION(1) = 3000. /

```

Имейте в виду, что (1) добавлена в параметры реакции, чтобы подчеркнуть факт, что эти параметры сохраняются в массивах длины N\_REACTIONS. Если требуется выполнить одну реакцию, не нужно добавлять (1), но было бы лучше добавить ее. Также имейте в виду, что HEAT\_OF\_COMBUSTION (теплота горения) – это энергия, выделенная в единице измерения массы топливного газа, которая смешивается кислородом и горит. Она не имеет ничего общего с процессом пиролиза, так почему задается здесь? Ответ на этот вопрос такой: в FDS может быть только одна реакция газовой фазы топлива и кислорода, но могут быть также множество различных реакций твердой фазы. Чтобы убедиться, что пары топлива разных материалов горят для получения соответствующего количества энергии, очень важно задать для каждого материала HEAT\_OF\_COMBUSTION (теплота сгорания). В этом случае скорость потери массы топливных газов будет автоматически регулироваться так, чтобы эффективная скорость потери массы, умноженная на теплоту сгорания, давала в итоге заданную скорость тепловыделения.

В различных примерах руководства по верификации можно найти несколько других примеров реакций твердой фазы. Смотрите Раздел 18.8.1 и 18.2.2

### **Твердое топливо, которое горит с определенной скоростью**

Реальные предметы, например, мебель, офисное оборудование и прочее, часто трудно определить через параметры SURF и MATL. Иногда информацию о данном предмете можно узнать из его величины термических свойств, температуры «возгорания», результирующей скорости горения как функция времени с начала горения. В таком случае добавьте строки:

```

&MATL ID = 'stuff'
  CONDUCTIVITY = 0.1
  SPECIFIC_HEAT = 1.0
  DENSITY = 900.0 /
&SURF ID = 'my surface'
  COLOR = 'GREEN'
  MATL_ID = 'stuff'
  HRRPUA = 1000.
  IGNITION_TEMPERATURE = 500.
  RAMP_Q = 'fire_ramp'
  THICKNESS = 0.01 /
&RAMP ID = 'fire_ramp', T= 0.0, F=0.0 / &
RAM ID = 'fire_ramp', T= 10.0, F=1.0 / &
RAMP ID = 'fire_ramp', T=310.0, F=1.0 / &
RAMP ID = 'fire_ramp', T=320.0, F=0.0 /

```

Заданный параметром, предмет со свойствами поверхности 'my surface' будет гореть со скоростью 1000кВ/м<sup>2</sup> после 10 секундной линейно-нарастающей характеристики, с момента,

когда температура поверхности достигает 500 °С. Горение будет продолжаться 5 минут, и затем линейно снижаться в течение 10 секунд. Имейте в виду, что время T в RAMP обозначает время начала возгорания. Также обратите, что теперь «температура возгорания» - это свойство поверхности, а не свойство материала.

После воспламенения поверхности, теплопередача в твердое тело будет все еще решаться, но между скоростью горения и температурой поверхности нет связи. В итоге, температура поверхности может намного повыситься. Чтобы вычислить потери энергии согласно испарению твердого топлива, для поверхности можно задать HEAT\_OF\_VAPORIZATION (теплота испарения). Например, при применении строк ниже, полезная теплопередача на поверхность материала уменьшается коэффициентом мгновенной скорости горения 1000 кДж/кг в час.

```

SURF ID                = 'my surface'
  COLOR                = 'GREEN'
  MATL_ID              = 'stuff'
  HRRPUA               = 1000.
  IGNITION_TEMPERATURE = 500.
  HEAT_OF_VAPORIZATION = 1000.
  RAMP_Q               = 'fire_ramp'
  THICKNESS            = 0.01 /

```

Параметры HRRPUA, IGNITION\_TEMPERATURE (теплота возгорания), и HEAT\_OF\_VAPORIZATION (теплота испарения) информируют FDS о том, что вы сами хотите контролировать скорость горения, а также, что вы хотите моделировать нагрев и «горение» топлива. Когда эти параметры появляются в строке SURF, они действуют во взаимодействии. Если появляется только HRRPUA, поверхность начинает гореть в начале моделирования как управляемая горелка.

Добавление IGNITION\_TEMPERATURE (температура возгорания) задерживает возгорание до тех пор, пока заданная вами температура не достигается. Добавление HEAT\_OF\_VAPORIZATION (теплота испарения) информирует FDS вычислить энергию, использованная для испарения топлива. При любых этих вариантах, если строка MATL запускается строкой SURF, которая содержит заданный HRRPUA, то строка MATL должна содержать только тепловые свойства. Как описано в предыдущей главе, в ней не должны быть параметры реакции, значение/выделение материалов и т. д. При задании HRRPUA, вы скорее контролируете скорость горения, вместо того, чтобы позволять протекать пиролизу, который основан на условиях окружающей среды.

### Жидкое топливо

За немногими исключениями, для жидкого топлива, тепловые свойства такие же, как в твердых материалах. Скорость испарения определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса (для дополнительной информации см. Техническое руководство программы FDS). Недостатком этого метода является то, что топливные газы горят безотносительно источников горения. Таким образом, если задается жидкое топливо, то топливо сразу же начинает гореть. Ниже приводится пример стального поддона, который заполнен тонким слоем этанола. Имейте в виду, что свойства материала не полностью проверены.

```

&MATL ID                = 'ETHANOL LIQUID'
  EMISSIVITY            = 1.0
  NU_FUEL               = 0.97
  HEAT_OF_REACTION      = 880.
  CONDUCTIVITY          = 0.17
  SPECIFIC_HEAT         = 2.45

```

```

DENSITY = 787.
ABSORPTION_COEFFICIENT = 40.
BOILING_TEMPERATURE = 76. /

&MATL ID = 'STEEL'
EMISSIVITY = 1.0
DENSITY = 7850
CONDUCTIVITY = 45.8
SPECIFIC_HEAT = 0.46 /
&MATL ID = 'CONCRETE'
DENSITY = 2200
CONDUCTIVITY = 1.2
SPECIFIC_HEAT = 0.88 /
&SURF ID = 'ETHANOL POOL'
FYI = '4kg of ethanol in a 0.7 m x 0.8 m pan'
COLOR = 'YELLOW'
MATL_ID = 'ETHANOL LIQUID','STEEL','CONCRETE'
THICKNESS = 0.0091,0.001,0.05
TMP_INNER= 18. /

```

Включение BOILING\_TEMPERATURE (температура кипения) в список MATL информирует FDS использовать модель пиролиза жидкости. Она также автоматически задает N\_REACTIONS=1, то есть только «реакцию» изменения фазы из жидкости в газообразное топливо. Таким образом, HEAT\_OF\_REACTION (теплота реакции) в этом случае - это теплота испарения. Выделение газового топлива NU\_FUEL равняется 0.97 вместо 1, чтобы вычислить загрязнения в жидкости, которые не участвуют в процессе горения.

Удельная теплопроводность, плотность и теплоемкость используются для вычисления потерь тепла в жидкости через теплопроводность, используя то же самое одномерное уравнение теплопередачи, которое используется для твердых тел. Очевидно, что конвекция жидкости очень важна, но она не рассчитана в модели.

Обратите внимание на ABSORPTION\_COEFFICIENT (коэффициент поглощения) для жидкости. Это обозначает поглощение излучения внутри жидкости. Жидкости поглощают излучение не только на поверхности, но и на тонком слое вблизи поверхности. Действие коэффициента поглощения на скорость очень важно. Пример дается в Главе 19.1.1.

#### **8.4.3. Дополнительный вопрос: Процесс выгорания топлива (BURN\_AWAY)**

Если горящий предмет исчезает из вычисления, причиной этого является израсходованное топливо, задайте BURN\_AWAY=.TRUE. Будьте внимательны при использовании этого параметра. Если предмет способен выгорать, требуется отдельно установить значительный объем дополнительной памяти, чтобы сохранить данные о поверхности, так как разрушаются прямоугольные блоки. Если задается BURN\_AWAY (выгорание) как параметр SURF, то твердый предмет параметром SURF\_ID исчезает из вычисления, так как масса каждой ячейки сетки израсходована. Масса каждой ячейки сетки равна объему ячейки сетки, умноженному на DENSITY (плотность) материалов, создающие препятствие.

Также имейте в виду, что, если задается BURN\_AWAY, SURF должен быть применен не только к грани предмета, но к целому предмету, так как не понятно как контролировать края твердотельных препятствий, у которых разные SURF\_ID на разных гранях.

Также обратите внимание, что количество воспламеняющегося топлива равна DENSITY (плотности) обозначенных материалов, умноженная на объем ячейки сетки. Если объем препятствия изменяется, так как он должен соответствовать равномерной сетке, FDS не

задает скорость горения для этого вычисления, так как она задает разные параметры, связанные с зонами как HRRPUA.

Если все компоненты материала поверхности взаимодействуют, а при реакции пиролиза не возникает твердый остаток, то толщина поверхности будет уменьшаться, когда поверхность вступает в реакцию. Уменьшение можно предотвратить в численной модели, задав в строке SURF SHRINK=.FALSE. Однако, задав SHRINK=.FALSE. можно ввести численные проблемы в решающее устройство стены. Когда все материалы уменьшенной поверхности расходуются, а BURN\_AWAY не задается, температура поверхности задается на TMP\_BACK, конвективный тепловой поток и скорость горения на 0.

#### **8.4.4 Дополнительный вопрос: Исходное и обратное граничные условия.**

По умолчанию исходная температура твердого материала задается при температуре окружающей среды. Для задания различной исходной температуры, используйте TMP\_INNER в строке SURF. Также, обратная температура граничного условия твердого тела может быть задана в строке SURF параметром TMP\_BACK. TMP\_BACK - это не фактическая температура задней поверхности, а температура газа, с помощью которой нагревается поверхность. Этот параметр не предназначен для поверхностей с BACKING='EXPOSED' или BACKING='INSULATED'.

Имейте в виду, что параметры TMP\_INNER и TMP\_BACK предназначены только для твердых тел, у которых задана THICKNESS (толщина) и свойства материала (через ключевое слово MATL\_ID).

#### **8.4.5 Дополнительный вопрос: Численная точность и устойчивость**

Для того чтобы вычислить температуру и реакции внутри твердых тел, FDS численно решает одномерное уравнение теплопередачи. Размер ячейки сетки на поверхности твердого тела автоматически выбирается с помощью линейки, которая уменьшает размер ячейки, на квадратный корень коэффициента температуропроводности материала ( $k/\rho c$ ). По умолчанию, ячейки клетки увеличиваются по отношению среднего размера слоя материала и на границах слоя являются самыми маленькими.

Параметры по умолчанию обычно подходят для простого вычисления теплопередачи, но иногда при использовании реакции пиролиза изменяется температуры и скорости и горения. Численная устойчивость решения твердой фазы можно может быть улучшена, делая плотность сетки более однообразной и уменьшая ячейки сетки. Также необходимо задать параметры при чрезвычайном нестационарном конвективном теплообмене. Чтобы сделать сетки однородными полностью, в строке SURF используйте STRETCH\_FACTOR=1 (коэффициент растяжения). Значения от 1 до 2 предоставляют разные уровни растяжения. Размер всех ячеек сетки могут быть масштабированы заданием CELL\_SIZE\_FACTOR (коэффициент масштабирования ячейки) меньше чем на 1.0. Например, CELL\_SIZE\_FACTOR (коэффициент размера ячейки) =0,5 уменьшает размер ячейки сетки наполовину. Задание WALL\_INCREMENT=1 (увеличение стены) в строке TIME принуждает температуру твердой фазы решаться на каждом временном шаге.

Варианты проверки и уточнение точности вычисления твердой фазы смотрите Главу 18.1.

### **8.5 Функции, задаваемые пользователем: Группы RAMP и TABL**

Большинство параметров, заданных во входном файле представляют собой фиксированные константы. Однако существуют некоторые параметры, которые могут изменяться в зависимости от времени, температуры или координат. Данные функции могут быть комплексными, поэтому требуется наличие средства их передачи. Группы RAMP и TABL, как видно из названий, позволяют контролировать характер изменения выбранных

параметров. RAMP позволяет задать такую функцию, где одна зависимая переменная (например, скорость) зависит от одной независимой переменной (например, времени). TABL позволяет задавать функцию влияние сложных независимых переменных (например, пространственный угол) на составные зависимые переменные (например, скорость струи спринклера и скорость капель).

### 8.5.1 Функции, зависящие от времени

В начале любого расчета температура равна температуре окружающей среды, скорость потока везде равна нулю, ничего не горит и массовые доли всех видов вещества постоянны. При запуске расчета температуры, скорости, скорости горения и *т.д.* постепенно повышаются по сравнению с их исходными значениями, так как ничего не может произойти мгновенно. По умолчанию все показатели постепенно повышаются до их заданных величин примерно за 1 секунду. Однако можно контролировать скорость включения и выключения параметров, задавая динамику изменения граничных условий, перечисленных в строке SURF. Для вышеуказанных граничных условий можно задать временную зависимость при помощи либо существующих функций, либо функций, определяемых пользователем. Параметры TAU\_Q, TAU\_T, и TAU\_V означают, что скорость выделения тепла (HRRPUA); температура поверхности (TMP\_FRONT); и/или нормальная составляющая скорости (VEL, VOLUME\_FLUX), или MASS\_FLUX\_TOTAL должны повыситься до их заданных значений за TAU секунд и остаться на этом уровне. Если TAU\_Q положительное, то скорость выделения тепла увеличивается по гиперболическому тангенсу  $\tanh(t/\tau)$ . Если отрицательное, то скорость выделения тепла увеличивается по квадратичному закону  $(t/\tau)^2$ . Если пламя растет по квадратичному закону  $t^2$ , то оно останется постоянным после TAU\_Q секунд. Те же принципы верны и для TAU\_T и TAU\_V. Значение по умолчанию для всех TAU равно 1 секунде. Если требуется повышение какому-либо другому закону, отличному от гиперболического тангенса и  $t^2$ , то нужно ввести задаваемую пользователем динамику горения. Для этого задайте RAMP\_Q, RAMP\_T или RAMP\_V, соответствующее символьной строке, обозначающей линейную функцию для применения непосредственно на этом типе поверхности, затем во входном файле создайте строки следующего вида:

```
&RAMP ID='rampname1', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='rampname1', T= 5.0, F=0.5 /
&RAMP ID='rampname1', T=10.0, F=0.7 /
...
...
...
&RAMP ID='rampname2', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='rampname2', T=10.0, F=0.3 /
&RAMP ID='rampname2', T=20.0, F=0.8 /
...
...
...
```

Где T – это время, а F обозначает долю скорости выделения тепла, температуры стены, скорости, массовой доли, и т.д., которые необходимо применить. Линейная интерполяция используется для заполнения промежуточных моментов времени. Убедитесь в том, что заданная функция запускается при T=0.0.

Учтите, что каждая последовательность строк RAMP должна иметь уникальный ID и строки должны быть перечислены с монотонно возрастающим T.

Учтите, что TAUы и RAMPы являются взаимоисключающими. Для параметров одной поверхности оба эти параметра задавать нельзя.

Приведем пример. Обычной приточной вентиляцией можно управлять при помощи следующих строк:

```
&SURF ID='BLOWER',VEL=-1.2, TMP_FRONT=50., RAMP_V='BLOWER RAMP',
RAMP_T='HEATER RAMP' /
&RAMP ID='BLOWER RAMP',T= 0.0,F=0.0 /
&RAMP ID='BLOWER RAMP',T=10.0,F=1.0 /
&RAMP ID='BLOWER RAMP',T=80.0,F=1.0 /
&RAMP ID='BLOWER RAMP',T=90.0,F=0.0 /
&RAMP ID='HEATER RAMP',T= 0.0,F=0.0 /
&RAMP ID='HEATER RAMP',T=20.0,F=1.0 /
&RAMP ID='HEATER RAMP',T=30.0,F=1.0 /
&RAMP ID='HEATER RAMP',T=40.0,F=0.0 /
```

Теперь температура и скорость приточного воздушного потока будет подчиняться тем же линейно-нарастающим функциям.

Учтите, что температурой и скоростью можно отдельно управлять путем задания различных RAMPов для RAMP\_T и RAMP\_V соответственно.

Используйте TAU\_MF (N) или RAMP\_MF (N) для управления повышениями массовой доли или массового расхода компонентов N. Массовая доля компонентов N на поверхности задана следующим образом:

$$Y_N(t) = Y_N(0) + f(t)(Y_N - Y_N(0))$$

где  $Y_N(0)$  это массовая доля компонентов окружающей среды N (MASS\_FRACTION\_0 в N-ой строке SPEC используется для задания  $Y_N(0)$ ),  $Y_N$  это необходимая массовая доля, на которую функция  $f(t)$  повышается (MASS\_FRACTION (N) заданная в строке SURF используется для задания  $Y_N$ ). Функция  $f(t)$  это либо гиперболический тангенс, либо  $t^2$ , либо задаваемая пользователем функция. Для задаваемой пользователем функции укажите имя линейно-нарастающей функции при помощи символьной строки RAMP\_MF (N).

### 8.5.2 Функции, зависящие от температуры

Тепловые свойства, такие как проводимость и удельная теплоемкость могут существенно изменяться в зависимости от температуры. В таких случаях используйте функцию RAMP следующим образом:

```
&MATL ID = 'STEEL'
FYI = 'A242 Steel'
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_steel'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_steel'
DENSITY = 7850. /
```

```
&RAMP ID='c_steel' , T= 20., F=0.45 /
&RAMP ID='c_steel' , T=377., F=0.60 /
&RAMP ID='c_steel' , T=677., F=0.85 /
```

```
&RAMP ID='k_steel' , T= 20., F=48. /
&RAMP ID='k_steel' , T=677., F=30. /
```

Учтите, что здесь (в отличие от временных зависимостей) параметр F - это значение физической величины, а не доля. Таким образом, если используется CONDUCTIVITY\_RAMP, не должна быть задана CONDUCTIVITY (проводимость). Учтите,

что для значений температуры, T, выше и ниже заданного диапазона, FDS примет постоянное значение равное первой или последней заданной F.

Учтите, что каждый ряд строк RAMP должен иметь уникальный ID и строки должны быть перечислены в порядке монотонного возрастания T.

### 8.5.3 Табличные функции

Некоторые входные величины, такие как характер распыления спринклера, изменяются многомерно. В таких случаях используйте группу TABL. Формат строк TABL это прикладной формат, и имеет следующий вид:

```
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=40, 50, 85, 95, 10, 0.5 /  
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=40, 50, 185, 195, 10, 0.5 /
```

Подробное описание различных позиций таблицы дано в разделах, описывающих величины, используемые в данных таблицах. В настоящее время данная группа параметров используется лишь для спринклеров и распылителей для описания сложного характера распыления.

Учтите, что каждый ряд строк TABL должен иметь уникальный ID. Специальные требования к последовательности строк будут зависеть от типа TABL, и они даны в соответствующем разделе данного руководства.

## 8.6 Цвета препятствий, вентиляционных отверстий, поверхностей и сеток

Цвета большинства элементов FDS можно задать двумя способами: тройкой натуральных чисел после ключевого слова RGB или при помощи одной из символьных строк наименований COLOR (цвет).

Используется три натуральных числа RGB в диапазоне от 0 до 255, обозначающих количество Red (красный), Green (зеленый) и Blue (синий) составляющих цвета. Если определять COLOR по его наименованию, крайне важно ввести его наименование точно как указано в списке таблицы цветов в данном документе и на сайте FDS.

В Таблице 8.1 дано несколько примеров значений RGB и наименований COLOR для различных цветов. Полный список всех цветов 500+, которые можно задать по наименованию после ключевого слова COLOR, доступен на сайте FDS. Если наименование COLOR отсутствует в таблице на сайте, то это наименование не подходит для FDS.

Настоятельно рекомендуется задавать цвета для поверхностей при помощи строки SURF, поскольку геометрия расчетов FDS все усложняется, то очень удобно использовать цвет в качестве выборочной проверки для определения были ли необходимые свойства поверхности заданы по всему рассматриваемому помещению или зданию.

Например, если необходимо чтобы все поверхности, ассоциирующиеся с заданной строкой SURF, имели одинаковый цвет, задайте тройку натуральных чисел – наименование RGB в строке SURF. Например, следующая строка SURF:

```
&SURF ID='UPHOLSTERY',...,RGB=0,255,0 /
```

окрасит мебелировку с SURF “UPHOLSTERY” («обивка») в зеленый цвет в Smokeview. Рекомендуется избегать использования основных цветов, так как эти же цвета используются в Smokeview для прорисовки цветных контуров.

Препятствия и вентиляционные отверстия можно окрашивать по отдельности (перекрывая заданные в строке SURF значения RGB), задавая значение COLOR для любого из перечисленных наименований Таблицы 8.1 или 'INVISIBLE' (невидимый) в

соответствующей строке OBST или VENT. Использование 'INVISIBLE' ведет к тому, что вентиляционное отверстие или препятствие не будет изображено.

Задавать цвета также можно при помощи тройки натуральных чисел RGB в строке OBST или VENT для получения расширенной цветовой палитры. Предпочтительно использовать RGB, в частности для создания цветов, которые гармонируют с пастельными цветами, используемыми для отображения температур, концентраций, и *т.д.* См. Таблицу 8.1 со списком наименований цветов и значений RGB.

### 8.6.1 Наложение текстуры

Существуют различные способы задания цвета различным предметам в пределах вычислительного домена, но также есть способ наложения изображений на препятствия для того, чтобы изображения Smokeview выглядели более реалистично. Данный прием известен как «наложение текстуры». Например, для применения изображения обшивки деревянными панелями на стену, нужно добавить следующий текст в строку SURF, задавая физические свойства обшивки:

```
&SURF ID='wood paneling',..., TEXTURE_MAP='paneling.jpg', TEXTURE_WIDTH=1.,  
TEXTURE_HEIGHT=2./
```

Если файл JPEG под названием **paneling.jpg** существует в рабочей папке, Smokeview прочитает его и выведет изображение на экран там, где использована обшивка (для пользователей SGI: нужно использовать файлы rgb вместо файлов jpg). Учтите, что при первом запуске Smokeview изображение на экран не выводится. Данная команда вызывается при помощи меню Show/Hide (показать/скрыть). Параметры TEXTURE\_WIDTH (ширина текстуры) и TEXTURE\_HEIGHT (высота текстуры) являются физическими размерами изображения. В этом примере, изображение JPEG это часть обшивки шириной 1м и высотой 2м. Smokeview копирует изображение необходимое количество раз чтобы воспроизвести его там, где необходима обшивка. Внимательно проследите за тем, как изображение воспроизводится при наложении на сцену. Если у изображения нет заданного шаблона, то трудностей с его повторением не возникнет. Если у изображения задано направление, следует добавить реальную тройку чисел TEXTURE\_ORIGIN (отправная точка/начало текстуры) в строку VENT или OBST, где необходимо применить карту наложения текстуры. Например:

```
&OBST XB=1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,7.0, SURF_ID='wood paneling', TEXTURE_ORIGIN=1.0,3.0,5.0/  
применяет обшивку на препятствие, размеры которого составляют 1x1x2м, так, что  
изображение обшивки расположено в точке (1.0,3.0,5.0). По умолчанию значение  
TEXTURE_ORIGIN составляет (0,0,0), а основное значение по умолчанию можно изменить  
путем добавления оператора TEXTURE_ORIGIN в строку MISC.
```



Таблица 8.1: Пример определения цветов (Полный список представлен на сайте)

Наименование		R	G	B	Наименование		R	G	B
AQUAMARINE		127	255	212	MAROON		128	0	0
ANTIQUÉ WHITE		250	235	215	MELON		227	168	105
BEIGE		245	245	220	MIDNIGHT BLUE		25	25	112
BLACK		0	0	0	MINT		189	252	201
BLUE		0	0	255	NAVY		0	0	128
BLUE VIOLET		138	43	226	OLIVE		128	128	0
BRICK		156	102	31	OLIVE DRAB		107	142	35
BROWN		165	42	42	ORANGE		255	128	0
BURNT SIENNA		138	54	15	ORANGE RED		255	69	0
BURNT UMBER		138	51	36	ORCHID		218	112	214
CADET BLUE		95	158	160	PINK		255	192	203
CHOCOLATE		210	105	30	POWDER BLUE		176	224	230
COBALT		61	89	171	PURPLE		128	0	128
CORAL		255	127	80	RASPBERRY		135	38	87
CYAN		0	255	255	RED		255	0	0
DIMGRAY		105	105	105	ROYAL BLUE		65	105	225
EMERALD GREEN		0	201	87	SALMON		250	128	114
FIREBRICK		178	34	34	SANDY BROWN		244	164	96
FLESH		255	125	64	SEA GREEN		84	255	159
FOREST GREEN		34	139	34	SEPIA		94	38	18
GOLD		255	215	0	SIENNA		160	82	45
GOLDENROD		218	165	32	SILVER		192	192	192
GRAY		128	128	128	SKY BLUE		135	206	235
GREEN		0	255	0	SLATEBLUE		106	90	205
GREEN YELLOW		173	255	47	SLATE GRAY		112	128	144
HONEYDEW		240	255	240	SPRING GREEN		0	255	127
HOT PINK		255	105	180	STEEL BLUE		70	130	180
INDIAN RED		205	92	92	TAN		210	180	140
INDIGO		75	0	130	TEAL		0	128	128
IVORY		255	255	240	THISTLE		216	191	216
IVORY BLACK		41	36	33	TOMATO		255	99	71
KELLY GREEN		0	128	0	TURQUOISE		64	224	208
KHAKI		240	230	140	VIOLET		238	130	238
LAVENDER		230	230	250	VIOLET RED		208	32	144
LIME GREEN		50	205	50	WHITE		255	255	255
MAGENTA		255	0	255	YELLOW		255	255	0

## Глава 9

### Модели горения и излучения

Часто в FDS возникает путаница в разграничении понятий *горения* газовой фазы и *пиролиза* твердой фазы. Первое относится к реакции паров топлива и кислорода, а последнее – к образованию паров топлива с твердой или жидкой поверхности. Несмотря на то, что видов топлива при моделировании пожара FDS может быть несколько, газообразное топливо может быть только одно. Все дело в затратах. Решение уравнений переноса для различных видов газообразного топлива требует больших вычислительных усилий. В связи с этим для вычисления разницы теплоты сгорания различных видов топлива, FDS в автоматическом режиме корректирует скорости выгорания твердых веществ и жидкостей. Фактически, задав одну реакцию газовой фазы, вы используете ее в качестве заменителя всех источников топлива.

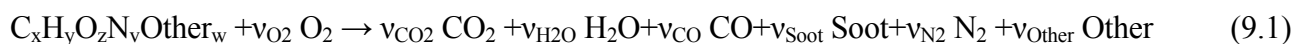
Реакцию газовой фазы можно представить двумя моделями. Модель по умолчанию, так называемая *модель доли в смеси* используется для вычисления выделения паров топлива с его поверхности в ходе процесса горения. Вторая модель - *модель конечной скорости горения*, в которой все отдельные газы, участвующие в процессе горения задаются и передаются отдельно. В отличие от модели доли в смеси, данная модель является более ресурсозатратной и более сложной. В данной главе описываются обе модели, однако большее внимание уделяется более распространенной модели доли в смеси.

#### 9.1 Модель доли в смеси: группа REAC

Существует два способа обозначения пожара: первый – задать скорость выделения тепла с единицы площади (HRRPUA) в строке SURF. Второй способ – задать HEAT\_OF\_REACTION, а также другие тепловые параметры в строке MATL, и в этом случае скорость горения топлива зависит от обратного теплового потока к поверхности. В обоих случаях используется доля в смеси модели горения. Фактически само наличие этих параметров автоматически запускает модель доли в смеси. Не обязательно явно задавать компоненты газов, таких как кислород, если уже задана скорость выделения тепла или скорость реакции твердой фазы.

Единственная строка REAC используется в модели доли в смеси. Если данная строка отсутствует во входном файле, то в качестве заменяющего топлива будет использоваться пропан, и все показатели скорости горения будут соответствующим образом скорректированы. Если задать только скорость выделения тепла при пожаре (HRRPUA), то параметры реакции не подвергнутся изменениям, и не будет необходимости добавлять строку REAC во входной файл. Тем не менее, если у вас есть информация о преобладающем топливном газе, вы можете задать как минимум основную стехиометрию при помощи строки REAC.

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



Необходимо лишь задать химическую формулу топлива вместе с выделением CO, сажи и H<sub>2</sub>, а также количество водорода в саже,  $H_{frac}$ . Для полноты можно задать содержание N<sub>2</sub> в топливе и наличие других компонентов. FDS сама использует данную информацию для вычисления объема продуктов горения, представленных в следующем виде:

$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2}$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - H_{frac})v_{soot}$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{H_{frac}}{2}v_{soot} - v_{H_2}$$

$$v_{CO} = \frac{W_f}{W_{CO}}y_{CO}$$

$$v_{H_2} = \frac{W_f}{W_{H_2}}y_{H_2}$$

$$v_{soot} = \frac{W_f}{W_S}y_S$$

$$v_{N_2} = \frac{v}{2}$$

$$v_{other} = w$$

$$W_S = H_{frac}W_H + (1 - H_{frac})W_C$$

В строке REAC могут быть заданы следующие параметры. Заметим, что различные YIELDы приведены для условий достаточной вентиляции за пределами пламени. Есть функции для прогнозирования выделения различных компонентов при сценарии пожара в условиях недостаточной вентиляции, но эти специальные модели также требуют задания CO, сажи и других ниже перечисленных компонентов за пределами пламени.

ID – Последовательность символов, обозначающих реакцию.

C, H, O, N, OTHER – Химическая формула топлива. Состоит из положительных чисел. (Только для доли в смеси, по умолчанию даны значения пропана)

MW\_OTHER – Средняя молекулярная масса для OTHER (г/моль). (Только для доли в смеси, по умолчанию дана молекулярная масса N<sub>2</sub>, 28 г/моль)

Y\_O2\_INFTY – Массовая доля кислорода в окружающей среде (Только для доли в смеси, по умолчанию 0,23)

Y\_F\_INLET – Массовая доля топлива в струе топлива (Только для доли в смеси, по умолчанию 1.0)

SOOT\_YIELD – Массовая доля топлива, преобразующегося в частицы дыма,  $y_s$ . Заметим, что этот параметр не применим к процессам увеличения сажи и окислению, а скорее применим к выпуску частиц дыма из огня. (Только для доли в смеси, по умолчанию 0.01)

SOOT\_H\_FRACTION – Доля атомов водорода в саже. (Только для доли в смеси, по умолчанию 0.1)

CO\_YIELD – Массовая доля топлива, преобразующегося в окись углерода,  $y_{CO}$ . (Только для доли в смеси, по умолчанию 0.0)

H2\_YIELD Массовая доля топлива, преобразующаяся в водород,  $y_{H_2}$ . (Только для доли в смеси, по умолчанию 0.0)

HEAT\_OF\_COMBUSTION  $\Delta H$  (кДж/кг). Объем энергии, выделяемой на единицу массы топлива. Заметим, что если теплота сгорания не задана, предполагается что она равняется:

$$\Delta H \approx \frac{\nu_{O_2} W_{O_2}}{\nu_f W_f} * EPUMO2 \text{ кДж/кг}$$

EPUMO2 Объем энергии, выделяемой на единицу массы кислорода. (кДж/кг) По умолчанию 13,100 кДж/кг. Заметим, что если заданы оба значения EPUMO2 и HEAT\_OF\_COMBUSTION, тогда FDS не учтет значение EPUMO2.

IDEAL Логическое значение, указывающее, представляют ли значения EPUMO2 или HEAT\_OF\_COMBUSTION значения при полном сгорании (.TRUE.) или при неполном сгорании (.FALSE.), то есть значения, вычисляемые при заданных  $y_{CO}$ ,  $y_{H_2}$ , and  $y_S$ . Если IDEAL, то FDS сама скорректирует  $\Delta H$  для вычисления продуктов неполного сгорания.

Далее приведено несколько примеров строки REAC. Значения даны только в ознакомительных целях.

```
&REAC ID           = 'METHANE'
      C             = 1.
      H             = 4. /
```

```
&REAC ID           = 'PROPANE'
      SOOT_YIELD    = 0.01
      C             = 3.
      H             = 8.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 46460.
      IDEAL         = .TRUE. /
```

```
&REAC ID           = 'PROPANE'
      SOOT_YIELD    = 0.01
      C             = 3.
      H             = 8.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 46124.
      IDEAL         = .FALSE. /
```

```
&REAC ID           = 'ACRYLONITRILE'
      C             = 3.
      H             = 3.
      N             = 1.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 24500.
      IDEAL         = .TRUE. /
```

```
&REAC ID           = 'CARBON DISULFIDE'
      C             = 1.
      Other         = 2.
      MW_OTHER      = 32.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 13600.
      IDEAL         = .TRUE. /
```

### 9.1.1 Основные вопросы по моделям доли в смеси

В данном разделе поясняются различные приближения, влияющие как на параметры газовой фазы (строка REAC), так и на параметры твердой (или жидкой) фазы (строка SURF). Эти

приближения необходимы, чтобы компенсировать меньшее, чем требуется, разрешение сетки, или ограничения модели доли в смеси.

**Теплота сгорания:** По умолчанию значение EPUMO2 группируется со стехиометрическими параметрами, перечисленными в строке REAC для вычисления теплоты сгорания. Если задать HEAT\_OF\_COMBUSTION, то данное вычисление будет отменено. Тем не менее, если значения теплоты сгорания были заданы в строке MATL, и теплота сгорания материала отличается от заданной в основной реакции, то следует добавить HEAT\_OF\_COMBUSTION (кДж/кг) в строку MATL. В модели доли в смеси предполагается наличие только одного вида топлива. Тем не менее, в ситуации настоящего пожара вследствие возгорания различных предметов в здании, видов топлива может быть много. Следует задать стехиометрию основной реакции при помощи группы REAC. Если стехиометрия горящего материала отличается от основной реакции, параметр HEAT\_OF\_COMBUSTION используется чтобы удостовериться в том, что эквивалентное количество топлива вводится в домен с горящего предмета.

**Газовая фаза пожаротушения:** Моделирование пожаротушения с помощью таких подавителей как CO<sub>2</sub> или мелкодисперсная вода, или с помощью откачивания кислорода из помещения представляется проблематичным из-за того, что существенные физические механизмы наблюдаются в масштабе длин меньшем, чем одна ячейка сетки. Тушение огня происходит за счет пониженных температур и уменьшения подачи кислорода. В FDS используется простой алгоритм пожаротушения, который оценивает, жизнеспособно ли пламя на границе топливо-кислород. Более подробно о принципах работы механизма можно прочитать в Техническом Руководстве [1]. Параметры, доступные для самостоятельной настройки: Предельный кислородный индекс X\_O2\_LL и CRITICAL\_FLAME\_TEMPERATURE (критическая температура пламени). Оба параметра задаются в строке REAC. Значения по умолчанию 0.15 (объемная доля) и 1427°C соответственно. Для исключения тушения в газовой фазе задайте 0 для X\_O2\_LL. Для полного выключения тушения задайте SUPPRESSION=.FALSE в строке MISC.

**Выделение CO:** Используется алгоритм, вычисляющий горение в виде двухступенчатой реакции, прогнозирующий образование и распад CO. Более подробно о принципах работы механизма можно прочитать в «Техническом руководстве» [1]. Данный алгоритм используется, когда в строке MISC параметр CO\_PRODUCTION задан .TRUE. Несмотря на то, что алгоритм прогнозирует образование CO и его конечное окисление при повышенной температуре, с его помощью невозможно прогнозировать выделение CO за пределами пламени. Например, в горящем помещении алгоритм прогнозирует повышенный уровень CO, но он не может прогнозировать концентрацию CO в отработавших газах, исходящих из области возгорания. Таким образом, даже при использовании данной модели следует самостоятельно задавать возможный параметр CO\_YIELD (выделение CO), который ожидается при пожаре в хорошо проветриваемых помещениях.

Учтите, что в активном режиме данный алгоритм требует использования трех параметров для доли в смеси вместо двух параметров, используемых, если он отключен. Соответственно выполнение данной операции займет больше времени и потребует больше ресурсов оперативной памяти. Если моделирование не предполагает пожара в плохо проветриваемых условиях, включать алгоритм выделения CO в целом бесполезно.

## 9.2 Дополнительные виды газа: группа SPEC

Обычно, если вы задаете огонь при помощи HRRPUA в строке SURF либо параметров реакции в строке MATL, применяется модель горения доли в смеси. Ряд из двух или трех скалярных переменных,  $Z_i$ , представляющих состояние процесса горения от чистого топлива ( $\sum Z_i = 1$ ) до чистого воздуха ( $\sum Z_i = 0$ ). Основные реагенты и продукты горения – топливо,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$  и сажа – все функции заранее занесены в таблицу доли в смеси,  $Z$ . Другими словами значения  $Z_i$  в любой заданной ячейке сетки определяют массовую долю всех перечисленных газов. Химический состав топлива, записанный под группой REAC, используется для создания таблицы, связывающей массовые доли с  $Z_i$ . *Не следует* явно перечислять реагенты и продукты горения.

Предположим, что газы, представленные в домене, не являются ни реагентами, ни продуктами горения. Данный газ можно отслеживать отдельно от доли в смеси при помощи дополнительного скалярного уравнения переноса<sup>1</sup>. Фактически наличие пламени совсем необязательно – FDS можно использовать для переноса смеси не участвующих в реакции идеальных газов.

Группа SPEC используется, чтобы задать каждый дополнительный компонент. Каждая строка SPEC должна включать как минимум наименование компонентов при помощи строки символов (ID). Затем если исходная массовая доля газа в окружающей среде не равна 0, то чтобы задать ее используется параметр MASS\_FRACTION\_0. В таблице 9.1 перечислены некоторые газы, которые могут использоваться в расчете. Физические свойства данных газов известны, их задавать не нужно. Однако, если в Таблице 9.1 отсутствует необходимый газ, его молекулярная масса MW должна быть задана в единицах измерения г/моль. Кроме того, при выполнении расчета DNS должны быть заданы или параметры потенциала Леннарда-Джонса  $\sigma$  (SIGMALJ) и  $\epsilon/k$  (EPSILONKLJ), или VISCOSITY (вязкость) (кг/м/с), CONDUCTIVITY (проводимость) (Вт/м\*К) и DIFFUSIVITY (диффузивность) ( $m^2/c$ ) между данными компонентами, а также заданы фоновые компоненты.

```
&SPEC ID='ARGON',MASS_FRACTION_0=0.1,MW=40. /
```

Например, строки:

```
&SPEC ID='ARGON', MASS_FRACTION_0=0.1, MW=40. /
```

```
&SPEC ID='HELIUM' /
```

```
&SURF ID='INLET', MASS_FRACTION(2)=0.2, VEL=-0.3, TAU_MF(2)=0.5, TAU_V=0.5 /
```

обозначают, что ARGON (аргон) и HELIUM (гелий) должны быть включены в расчет в дополнение к указанным/неуказанным по умолчанию BACKGROUND\_SPECIES='AIR'. На INLET (входе) смесь гелия (массовая доля 0.2), аргона (массовая доля 0.1, так как не задано ничего другого) и воздуха (массовая доля 0.7 - остаток), вытекает со скоростью 0.3 м/с в домен. Массовая доля гелия и скорость постепенно увеличиваются по гиперболическому тангенсу от аргумента ( $t/0.5$ ).

Если моделирование не включает модель доли в смеси – или из-за того, что горение не нужно или если задается реакция(и) с конечной скоростью (см. раздел 9.3) – следует задать,

---

<sup>1</sup> Часто дополнительный газ, представленный в расчете совпадает с продуктом горения, таким как водяной пар спринклера, или углекислый газ огнетушителя. Данные газы передаются отдельно, таким образом, водяной пар, образующийся в процессе горения, передается при помощи переменной доли в смеси и водяной пар, образующийся в процессе испарения капель спринклера, передается при помощи собственного уравнение переноса. При наличии спринклеров не следует задавать WATER VAPOR (водяной пар) в качестве дополнительного компонента, так как это делается автоматически.

что фоновые компоненты газа это не воздух. Для смеси газа, состоящей из  $n$  компонентов, FDS решает только уравнения переноса при  $n - 1$ , так как она также решает уравнение сохранения полной массы. Для того, чтобы задать параметры неявно определенных BACKGROUND\_SPECIES (фоновых компонентов), используйте строку MISC. Если эти компоненты не перечислены в Таблице 9.1, задайте их молекулярную массу, MW, и (при необходимости) их VISCOSITY (вязкость) и CONDUCTIVITY (проводимость). При отсутствии какого-либо из этих параметров присваиваются соответствующие значения 'AIR' (воздух).

Таблица 9.1: **Дополнительные компоненты газов [5]**

Компонент	Молекулярная масса (г/моль)	$\sigma$ (Å)	$k/\epsilon$ (K)
AIR (воздух)	29	3.711	78.6
CARBON DIOXIDE (диоксид углерода)	44	3.941	195.2
CARBON MONOXIDE (окись углерода)	28	3.690	91.7
HELIUM (гелий)	4	2.551	10.22
HYDROGEN (водород)	2	2.827	59.7
METHANE (метан)	16	3.758	148.6
NITROGEN (азот)	28	3.798	71.4
OXYGEN (кислород)	32	3.467	106.7
PROPANE (пропан)	44	5.118	237.1
WATER VAPOR (водяной пар)	18	2.641	809.1

Распознанные компоненты, которые являются эмиссионными, будут определены как ABSORBING (поглощающие) и для таких видов будет вычислено поглощение излучения. Ключевое слово ABSORBING можно также задать в строке SPEC. Если задано .TRUE. и компонент отсутствует в общепринятом списке, тогда будет подразумеваться, что это топливо при вызове RADCAL для вычисления его коэффициента поглощения.

### 9.3 Горение с конечной скоростью

Обычно FDS использует принципы доли в смеси для описания горения. Тем не менее, FDS также может явно отслеживать компоненты газов и реакции, в которые они могут между собой вступать. В данном разделе описывается, как это может происходить.

1. Настоятельно рекомендуется запускать реакции с конечной скоростью, только если FDS работает в режиме DNS. Следует задать `DNS=TRUE` в строке MISC. Учтите: можно использовать схему реакции с конечной скоростью при расчете LES, но, так как температура при крупномасштабном расчете распределяется по ячейке сетки, некоторые из параметров реакции могут потребовать корректировки для вычисления пониженных температур.

2. `BACKGROUND_SPECIES` в строке MISC обычно задан 'NITROGEN' (азот).

3. Группа SPEC используется для указания каждого дополнительного компонента. Не следует вводить строку SPEC для фоновых компонентов.

4. Граничные условия для компонентов газа описаны в Разделе 9.2.

5. Группа REAC используется для обозначения топлива и параметров скорости реакции. Для реакции с конечной скорости следует задать различные строки REAC. Заметим, что FDS будет вычислять реакции в том порядке, в каком они перечислены во входном файле.

**FUEL** Строка символов, обозначающая, какой из перечисленных дополнительных видов газа является топливом.

**OXIDIZER** Строка символов, обозначающая, какой из перечисленных дополнительных компонентов газа является окислителем.

**BOF** Предэкспоненциальный множитель в одноступенчатой химической реакции в единицах измерения  $\text{см}^3/\text{моль}/\text{с}$ .

**E** Энергия активации для одноступенчатой химической реакции в единицах измерения кДж/кмоль.

**NU** Массив, содержащий стехиометрию химической реакции для каждого SPEC, где отрицательные значения обозначают реагенты, а положительные значения обозначают продукты реакции. Заметим, что фоновые компоненты не могут вступать в реакцию.

**N\_S** Массив, содержащий экспоненты для уравнения с конечной скоростью для каждого SPEC. Заметим, что SPEC может быть присвоено N\_S, но не NU, то есть уравнение скорости может зависеть от компонентов, напрямую не вступающих в реакцию. Учтите, что фоновые компоненты не могут вступать в реакцию.

**HEAT\_OF\_COMBUSTION** Эффективная теплота горения химической реакции в единицах измерения кДж/кг. (значение по умолчанию 40,000 кДж/кг).



## 9.4 Перенос излучения: Группа RADI

Для большинства расчетов FDS перенос теплового излучения вычисляется по умолчанию и для этого не нужно задавать какие-либо параметры. Однако есть расчеты, при выполнении которых важно быть в курсе вопросов, связанных с решением уравнений переноса излучения. Наиболее важный вопрос касается доли энергии, выделенной пламенем как тепловое излучение, с общепринятым названием *доля излучения*. Это функция температуры пламени и химического состава, ни одну из которых невозможно достоверно рассчитать в крупномасштабном расчете пожара, так как поверхность пламени плохо разрешается на сетке. В расчетах, где ячейки сетки порядка 1 см и более, температуре около поверхности огня нельзя верить при расчете источникового члена в уравнении переноса излучения, в особенности из-за зависимости от  $T^4$ . Для уравнивания, если задать ненулевое значение RADIATIVE\_FRACTION в строке RADI, ячейка сетки, затронутая огнем, излучает ту долю химической энергии, которая выделяется в нее. Часть этой энергии может быть перепоглощена где-то еще, составляя общие потери излучения, меньшие, чем RADIATIVE\_FRACTION, в основном зависящие от масштаба пожара и концентрации сажи. Если нужно использовать уравнение переноса излучения в исходном виде, то следует задать нулевое значение для RADIATIVE\_FRACTION и в этом случае источниковый член в уравнении переноса излучения будет основан только на температуре газа и химическом составе. По умолчанию значение RADIATIVE\_FRACTION 0.35 для расчета LES, и 0 для DNS.

Существует несколько способов улучшения использования FVM (метода конечных объемов) при решении уравнения переноса излучения (RTE), большинство из которых увеличивают время вычислений. Решающее устройство имеет 2 режима выполнения работы – модель серого газа (по умолчанию) и широкополосная модель [1]. Данные модели можно изменить при помощи группы RADI. Если запущен режим модели серого газа (по умолчанию) можно увеличить количество углов со значения по умолчанию 100 при помощи параметра NUMBER\_RADIATION\_ANGLES (натуральное число). Частоту обращений к решающему устройству излучения можно уменьшить с каждого 3-го временного шага при помощи натурального числа TIME\_STEP\_INCREMENT. Приращение, с которым изменяются углы можно уменьшить с 5 при помощи натурального числа ANGLE\_INCREMENT. В общем, если TIME\_STEP\_INCREMENT и ANGLE\_INCREMENT оба заданы 1, то поле излучения полностью изменяется в каждый временной шаг, но при этом существенно увеличивается затратность расчета.

Существуют следующие несколько параметров, влияющие на поглощение излучения каплями воды: RADTMP – это предполагаемая температура источника излучения. Она используется при расчете среднего рассеивания и эффективных сечений поглощения капель воды. Значение по умолчанию 900°C. NMIEANG это количество углов в численном интегрировании функции фазы Ми. Увеличение NMIEANG повышает точность расчета. Затраты на повышение точности указываются на этапе инициализации, а не в процессе самого моделирования. Значение NMIEANG по умолчанию 15.

Если нужна дополнительная шестиполосная модель, следует задать WIDE\_BAND\_MODEL=.TRUE.. Рекомендуется использовать эту функцию, только если топливо не образует сажу, так как это существенно увеличивает затратность расчета. Для добавления трех дополнительных полос, следует задать CH4\_BANDS=.TRUE.. Дополнительная информация дана в Техническом Руководстве FDS.

Учтите, что также можно отключить решение уравнения переноса излучения (сэкономив при этом 20% времени ЦП), добавив RADIATION=.FALSE. в строку MISC. Для изотермических

расчетов излучение отключается в автоматическом режиме. Если произошло возгорание и излучение отключено, в этом случае общий уровень выделения тепла уменьшается на `RADIATIVE_FRACTION`, по сравнению с введенным в строку `RADI`. Эта энергия излучения полностью исключается из расчета. Более подробно с данной функцией можно ознакомиться в разделе 9.1.1.

## Глава 10

### Частицы и капли: группа PART

Лагранжевы частицы<sup>1</sup> используются в FDS в качестве капель воды или жидкого топлива, трассировщиков потоков и разных других объектов, которые не заданы или ограничены численной сеткой. Иногда частицы обладают массой, иногда нет. Некоторые испаряются, поглощают излучение и т.д.

PART – это группа для задания параметров, связанных с лагранжевыми частицами.

Все лагранжевы частицы должны быть четко определены при помощи группы PART. В предыдущих версиях FDS капельки воды и частицы дыма определялись неявно. Можно упрощенно описать капли воды и частицы дыма с помощью таких параметров, как WATER=.TRUE. и MASSLESS=.TRUE.

#### 10.1 Базовые сведения

Свойства различных типов лагранжевых частиц задаются с помощью группы PART. Также как в строках SURF описаны свойства твердой поверхности или вентиляционного отверстия, в строках PART содержится информация о частицах и каплях. Если определенный тип частиц описан в строке PART, то название присвоение этого типа осуществляется параметром PART\_ID. Резервированных PART\_ID нет, они все должны быть определены явно. Например, входной файл может иметь несколько строк PART, которые содержат свойства разных типов лагранжевых частиц:

```
&PART ID='my smoke',... /  
&PART ID='my water',... /
```

Эти лагранжевы частицы могут быть введены на твердой поверхности с помощью строки SURF, которая определяет свойства материала, например,

```
&SURF ...,PART_ID='my smoke' /
```

или тип PART (частиц) может быть взят из строки PROP для изменения свойств капель, образованных спринклером или форсункой, например,

```
&PROP ID='Acme Spk-123', QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',  
PART_ID='my water', ... /
```

Помните, что поверхность, на которой определены частицы, должна иметь ненулевую нормальную скорость, направленную в вычислительный домен. Это происходит автоматически, если поверхность горит, и должна быть задана, если не горит.

---

<sup>1</sup> В этом разделе термины «капли» и «частицы» взаимозаменяемы. С точки зрения FDS это все лагранжевы частицы; т.е. точечные элементы, не связанные структурой нижележащей сетки.

## 10.2 Контролирующие частицы и капли

В зависимости от того, как частицы или капли вводятся в вычислительный домен, на их управление влияют следующие параметры:

**DT\_INSERT** Временное приращение в секундах между введением «партии» частиц и капель. Количество на каждую «партию» зависит от того, как они вводятся. Чем больше нужно частиц, тем ниже должно быть входное значение этого параметра. По умолчанию значение 0,05с.

**SAMPLING\_FACTOR** Фактор выборки для выходного файла **CHID.prt5**. Этот параметр может применяться для уменьшения размера выходного файла частиц, используемого для графического представления результатов. Значение по умолчанию 1 для частиц MASSLESS (без массы), что означает, что каждая частица или капля будет отображаться в Smokeview. Для всех других типов частиц по умолчанию 10. О MASSLESS частицах говорится в разделе 10.4.

**AGE** Количество секунд, в течение которого существует частица или капля, после чего она удаляется из вычислений. Этим параметром удобно снижать число капель или частиц в расчете.

### Частицы, выделяющиеся у поверхности

Если частица обладает массой и выделяется с твердой поверхности, впишите **PARTICLE\_MASS\_FLUX** в строке SURF. Количество частиц, выделяемых в каждой твердой ячейке каждые **DT\_INSERT** секунд определяется **NPPC** в строке SURF, описывающей твердую поверхность. Значение **NPPC** по умолчанию 1. Например, следующая совокупность входных строк:

```
&PART ID='drops',
QUANTITIES(1:3)='DROPLET DIAMETER','DROPLET TEMPERATURE','DROPLET AGE',
DIAMETER=750., SAMPLING_FACTOR=1, COLOR='RED', EVAPORATE=FALSE. /
&SURF ID='HOLE', PART ID='drops', VEL=-5., PARTICLE MASS FLUX=0.1, COLOR='RED' /
&OBST XB=-0.2,0.2,-0.2,0.2,4.0,4.4, SURF_IDS='INERT','HOLE','INERT' /
```

создает препятствие, которое испускает неиспаряющиеся красные частицы со средним объемным диаметром 750 мк с интенсивностью 0,1кг/м<sup>2</sup>/с. FDS отрегулирует поток массы, если размеры препятствия или вентиляционного отверстия изменены, чтобы соответствовать численной сетке. Имейте в виду, что ID имеет значение идентификатора, и никакое другое. Частицы в Smokeview обозначены красным цветом, но могут быть окрашены в соответствии с их диаметром, температурой или возрастом.

### Капли, испускаемые спринклером или распылителем

**DROPLETS\_PER\_SECOND** (количество капель в секунду) – количество капель, испускаемых в секунду активным спринклером или распылителем. Значение по умолчанию 1000. Имейте в виду, этот параметр влияет только на спринклеры и распылители. Изменение этого параметра влияет не на интенсивность потока, а на количество капель в потоке. Также обратите внимание на то, что количество капель, испускаемых в одной «партии» равно **DROPLETS\_PER\_SECOND**, умноженное на **DT\_INSERT**.

Помните, что параметр <b>DROPLETS_PER_SECOND</b> может быть очень важным. В некоторых расчетах полезно увеличить это число, чтобы жидкая масса распределялась более равномерно по каплям. Если этот параметр слишком мал, это может привести к неравномерному характеру испарения, иногда даже до численной неустойчивости. Если
--

численная неустойчивость произошла вскоре после активации спринклера или форсунки, попробуйте увеличить DROPLETS\_PER\_SECOND, чтобы получить более равномерное испарение, которое более близко к реальности. Помните, что для реального спринклера или форсунки за секунду образуется гораздо больше капель, чем то число, которое *можно* рассчитать.

### Частицы или капли, вводимые в начале расчета

Иногда удобно ввести капли или частицы в начале расчета. Для этого используйте NUMBER\_INITIAL\_DROPLETS – это количество частиц/капель внутри вычислительного домена на начало расчета. По умолчанию 0, что означает, что с самого начала частиц или капель нет. Если стоит не ноль, задайте также MASS\_PER\_VOLUME (кг/м<sup>3</sup>), который определяет массу капель/частиц на единицу объема (по умолчанию 1 кг/м<sup>3</sup>). Не путайте этот параметр с DENSITY (плотность), описанным в следующем разделе. Например, DENSITY воды составляет 1000 кг/м<sup>3</sup>, тогда как литр воды, распыленный на капли в кубическом метре, имеет MASS\_PER\_VOLUME 1 кг/м<sup>3</sup>. Кроме того, чтобы ограничить частицы/капли в определенной области домена, добавьте действительные параметры XB, чтобы обозначить координаты прямоугольного объемного пространства. Формат XB то же самый, что и в строке OBST.

### Капли, падающие на твердую поверхность

Когда капля падает на твердую поверхность, она прилипает и обретает другую скорость и направление. Если поверхность горизонтальная, направление выбирается случайным образом. Если вертикальная, то вниз. Трудно подсчитать скорость, с которой капли движутся по горизонтальной и вертикальной поверхностям. Параметры HORIZONTAL\_VELOCITY и VERTICAL\_VELOCITY в строке PART позволяют вам контролировать скорость движения капель горизонтально или вертикально (вниз). По умолчанию 0,2 м/с и 0,5 м/с соответственно.

Обратите внимание на то, что, когда капли ударяются о препятствие, считается, что вертикальное направление совпадает с осью z независимо ни от каких изменений вектора ускорения силы тяжести GVEC.

## 10.3 Свойства частиц и капель

Для лагранжевых частиц, которые не являются MASSLESS, в строке PART должны быть заданы следующие параметры.

DENSITY Плотность жидкой капли или твердой частицы. (По умолчанию 1000 кг/м<sup>3</sup>).

SPECIFIC\_HEAT Удельная теплота жидкой капли или твердой частицы. (По умолчанию 4.184 кДж/кг/К).

DIAMETER Средний объемный диаметр частиц/капель, с распределением, сочетающим распределения Розин-Раммлера и логарифмически нормальное (по умолчанию 500 мк). Ширина распределения контролируется параметром GAMMA\_D (по умолчанию 2.4). Распределение Розина-Раммлера/логарифмически нормальное определяется:

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} e^{-\frac{[\ln(d'/d_m)]^2}{2\sigma^2}} dd' & (d \leq d_m) \\ 1 - e^{-0.693(\frac{d}{d_m})^\gamma} & (d_m < d) \end{cases} \quad (10.1)$$

Помните, что параметру  $\sigma$  присвоено значение  $\sigma=2/(\sqrt{2\pi}(\ln 2)\gamma)=1.15/\gamma$ , что обеспечивает плавное соединение двух функций в  $d=dm$ . Если вы хотите заместить эту функцию, можете добавить значение SIGMA\_D в строку PART. Чем больше значение  $\gamma$ , тем меньше разброс размера капель от среднего значения. Имейте в виду, вы можете запретить частицам или каплям превышение MAXIMUM\_DIAMETER, который по умолчанию бесконечно велик. А также то, что каплям с диаметром менее MINIMUM\_DIAMETER надлежит испариться через один временной шаг, устраняя неустойчивость численного решения, которая может присутствовать при слишком маленьком размере капель. По умолчанию MINIMUM\_DIAMETER 20 мк. Чтобы капли не различались по размерам, впишите MONODISPERSE=.TRUE. в строке PART, в этом случае все капли и частицы будут иметь одинаковый диаметр.

Следующие параметры нужны для описания испарения жидких капель. По умолчанию считается, что не-невесомые частицы являются жидкими каплями, но вы можете указать EVAPORATE=.FALSE., чтобы это изменить. Подробности см. в следующем разделе.

VAPORIZATION\_TEMPERATURE Температура кипения жидкой капли. (По умолчанию 100°C)

MELTING\_TEMPERATURE Точка таяния (плавления) жидкой капли. (По умолчанию 0°C)

INITIAL\_TEMPERATURE Начальная температура жидкой капли. (По умолчанию TMPA)

HEAT\_OF\_VAPORIZATION Скрытая теплота испарения жидкой капли. (По умолчанию 2259 кДж/кг)

#### 10.4 Особые типы частиц и капель

Есть несколько полезных атрибутов, которые вы можете приписать частицам или каплям с помощью простого логического параметра. Помните при использовании каждого из этих параметров, что его определение как .TRUE. может сделать другие параметры функционально бесполезными или вызвать противоречия, которые FDS может не выявить. Практика показывает, что лучше в каждом случае спрашивать себя, какую информацию *необходимо* сообщить программе, и придерживаться этого. Например, если частицы должны быть MASSLESS, нет смысла указывать другие параметры, кроме, может быть, COLOR в Smokeview.

##### Невесомые частицы

Самое простое применение лагранжевых частиц – это визуализация, где частицы считаются невесомыми индикаторами. В этом случае частицы определяются в строке

```
&PART ID='tracers', MASSLESS=.TRUE., ... /
```

Не забудьте, что если частицы MASSLESS, то не следует их раскрашивать в соответствии с конкретными свойствами. В отличие от ранних версий, частицы теперь раскрашиваются не по характеристикам газовой фазы, а по свойствам самих частиц. Например, 'DROPLET\_TEMPERATURE' для не-невесомых частиц относится к температуре самой частицы, а не к температуре окружающего газа.

Также примите во внимание, что если MASSLESS=.TRUE., то SAMPLING\_FACTOR установлен на 1, если вы не укажете другое, что будет абсурдным, т.к. невесомые частицы используются только для визуализации.

### Статические капли или частицы

STATIC – логический параметр, показывающий, движутся ли частицы или просто служат препятствием или помехой. Вписывать STATIC=.TRUE. имеет смысл только в сочетании с нулевым значением NUMBER\_INITIAL\_DROPLETS. Положение STATIC по умолчанию .FALSE.

### Водяные капли

WATER=.TRUE. говорит о том, жидкие капли испаряются, превращаясь в WATER VAPOR (водяной пар), отдельный вид газообразной фазы, который *автоматически* включается в вычисления этой командой. По умолчанию WATER=.FALSE., даже если предопределенные свойства капель соответствуют водяным. Определение WATER=.TRUE. заставляет FDS добавить WATER VAPOR как однозначно определенный вид вещества, а это также требует наличия соответствующих констант, относящихся к поглощению теплового излучения каплями воды. Также из-за этого в Smokeview капли обозначаются синим цветом.

Чтобы капли жидкости испарялись, превращаясь в какие-либо другие газообразные вещества, нужно описать вещество с помощью группы SPEC (см. раздел 9.2), а затем прописать соответствующий SPEC\_ID в строке PART.

### Капли топлива

FUEL=.TRUE. говорит о том, что жидкие капли испаряются в горючий газ и воспламеняются. В этом случае добавьте HEAT\_OF\_COMBUSTION (кДж/кг) топлива. По умолчанию капли топлива обозначены в Smokeview желтым цветом. Эта функция работает только для расчета горения по модели доли в смеси, где капли превращаются в эквивалентное количество паров топлива, так что конечная скорость теплоотдачи (при условии, что сгорание полное) равна скорости испарения, умноженной на HEAT\_OF\_COMBUSTION.

### Неиспаряющиеся частицы

Если вы не прописали MASSLESS=.TRUE. в строке PART, то предполагается, что частица или капля обладает массой и термическими свойствами, которые обуславливают ее нагрев и испарение. Чтобы не было испарения, пропишите EVAPORATE=.FALSE. Частицы все равно будут нагреваться из-за конвекции, но они не будут уменьшаться, и не надо будет указывать никаких дополнительных газообразных веществ.

Помните, что поглощение теплового излучения водой (WATER=.TRUE.) или каплями топлива (FUEL=.TRUE) регулируется в FDS с помощью многократно проверенных подмоделей, подробности работы которых содержатся в «Техническом руководстве по применению FDS» [1]. Но для произвольных частиц или капель не существует поглощения с излучением.

## 10.5 Цветные частицы и капли

Параметр QUANTITIES – это массив символьных строк, показывающих, какие скалярные величины должны быть использованы для цветового обозначения частиц или капель при анимации. Выбор 'DROPLET\_TEMPERATURE' (°C), 'DROPLET\_DIAMETER' (мк), 'DROPLET\_VELOCITY' (м/с), 'DROPLET\_MASS' (кг), 'DROPLET\_AGE' (с).

По умолчанию, если ни одна QUANTITIES не указана и не выбрана в Smokeview, Smokeview отобразит все частицы одним цветом. Чтобы выбрать цвет, пропишите RGB или COLOR. По умолчанию водяные капли обозначаются голубым цветом, а капли топлива желтым. Все другие представлены черным.

## 10.6 Дополнительный вопрос: распыление топлива

Процесс образования водяных капель спринклерами был переработан таким образом, что можно рассчитать распыляющую форсунку жидкого топлива. Распыление топлива запускается включением фразы FUEL=.TRUE. в соответствующую строку PART. Характеристики распыляющей форсунки описываются так же, как и для спринклера. Ниже приведен пример распыляющей форсунки жидкого топлива (см. раздел 19.1.4):

```
&DEVC ID='nozzle_1', XYZ=4.0,-.3,0.5, PROP_ID='nozzle', QUANTITY='TIME',  
SETPOINT=0. /  
&PART ID='heptane droplets', FUEL=.TRUE., VAPORIZATION_TEMPERATURE=98.,  
HEAT_OF_VAPORIZATION=316., SPECIFIC_HEAT=2.25, DENSITY=688.,  
QUANTITIES(1:2)='DROPLET_DIAMETER','DROPLET_TEMPERATURE',  
DROPLETS_PER_SECOND=2000, DIAMETER=1000., HEAT_OF_COMBUSTION=44500.,  
DT_INSERT=0.02, SAMPLING_FACTOR=1 /  
&PROP ID='nozzle', PART_ID='heptane droplets', FLOW_RATE=1.96,  
FLOW_RAMP='fuel', DROPLET_VELOCITY=10., SPRAY_ANGLE=0.,30. /  
&RAMP ID='fuel', T= 0.0, F=0.0 /  
&RAMP ID='fuel', T=20.0, F=1.0 /  
&RAMP ID='fuel', T=40.0, F=1.0 /  
&RAMP ID='fuel', T=60.0, F=0.0 /
```

Температура парообразования (кипения) жидкого топлива дается в градусах Цельсия, теплота парообразования в кДж/кг, удельная теплота в кДж/кг/К, а плотность в кг/м<sup>3</sup>. Условие FUEL=.TRUE. автоматически требует использования модели доли в смеси, в котором топливо в виде образующихся капель сгорает по общей схеме реакции. Из-за того, что расчет горения доли в смеси по умолчанию предполагает, что топливо и кислород горят при смешивании (считается, что концентрация кислорода выше порога, определенного опытным путем), не надо указывать источник зажигания. В случае с большинством видов жидкого топлива небольшого количества испарений при температуре окружающей среды достаточно для начала процесса горения. В некотором смысле, это скрытое запальное пламя.

Помните, что эта функция неустойчива и зависит от сетки. Если ячейки сетки слишком крупные, распыляемое топливо разрезается до такой степени, что не воспламеняется. Нужная плотность зависит от вида топлива и количества выпущенного из форсунки топлива.

Расчеты капель воды и топлива возможны начиная с версии 5 FDS.
--



### 10.7 Дополнительный вопрос: тушение водой (только для модели доли в смеси)

Моделирование тушения огня водой весьма сложно, так как характерный размер физических процессов меньше ячейки сетки. В газообразном состоянии пламена гасятся благодаря понижению температуры и уменьшению концентрации кислорода. Информация о тушении в газообразном состоянии см. раздел 9.1.1

В твердом состоянии вода снижает скорость пиролиза топлива, охлаждая поверхность топлива, а также изменяет химические реакции, которые высвобождают топливный газ из твердого тела. Если жидкому или твердому топливу были присвоены параметры реакции в строке MATL, то не нужно задавать никаких дополнительных параметров тушения. Предполагается, что вода, ударяющаяся о поверхность топлива, отнимает энергию у процесса пиролиза и таким образом снижает скорость горения поверхности. Если поверхности была присвоена скорость выделения тепла на единицу площади (HRRPUA), должен быть задан параметр, регулирующий тушение пожара водой. Эмпирический способ вычислить тушение пожара водой – охарактеризовать снижение скорости пиролиза показательной функцией. Скорость местной потери массы топлива имеет вид:

$$m_n''(t) = m_{f,0}''(t) e^{-\int k(t) dt} \quad (10.2)$$

Здесь  $m_{f,0}''(t)$  массовая скорость выгорания на единицу площади, задаваемая пользователем, когда вода не применяется, а  $k$  – это функция местной массы воды на единицу площади.  $m_w''$ , выражается в  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

$$k(t) = E\_COEFFICIENT m_w''(t) s^{-1} \quad (10.3)$$

Параметр E\_COEFFICIENT нужно получать экспериментально, а выражается он в  $\text{м}^2/\text{кг}/\text{с}$ . Обычно этот тип алгоритма тушения применяется для сложного топлива, например, для товаров в коробках.

# Глава 11

## Устройства и логические схемы

С одной стороны, может показаться, что сплинкеры, датчики дыма, индикаторы теплового потока и термоэлементы совершенно не связаны между собой, но с точки зрения FDS – это просто устройства, работающие по индивидуальным сценариям, в зависимости от присущих им свойств. Они могут быть использованы для записи некоторых параметров моделируемой среды, например, как термоэлемент, или могут отображать математическую модель сложного сенсора, как датчик дыма, а в некоторых случаях они могут срабатывать самостоятельно, как таймер.

В предыдущих версиях FDS использовались отдельные группы для обозначения устройств: SPRK, HEAT, SMOD и THCP - но количество и разнообразие противопожарных сенсорных и измерительных датчиков продолжает расти, и структура данных в FDS не смогла бы с легкостью вместить все возможные варианты. Кроме того, логические схемы, связанные с включением датчика и последующими действиями, такими, как открытие вентиляционного отверстия, стали слишком сложными и часто вызывали сбои. Сейчас устройства соответствуют новому формату, который упрощает и расширяет набор сенсорных параметров.

Начиная с версии FDS 5, все устройства, в самом широком смысле этого слова, включаются в группу DEVC. Кроме того, их расширенные функциональные возможности распределяются по группам CTRL (управление) и PROP (свойства).

### 11.1 Расположение и ориентация устройств: Группа DEVC (Таблица 13.4)

Независимо от особых свойств, каждое устройство должно быть расположено в пределах вычислительного домена, либо над пролётом домена, как балочный датчик дыма. К примеру, спринклер расположен в пределах зоны заданной строкой:

```
&DEVC XYZ=3.0,5.6,2.3, PROP_ID='Acme Sprinkler 123', ID='Spk_39' /
```

Физические координаты устройства заданы тремя числами XYZ. Свойства устройства содержатся в строках PROP и PROP\_ID, о чем будет сказано дальше с дополнительными пояснениями к каждому отдельному устройству. Строка символов ID – просто метка для распознавания устройства в исходящих файлах и в случаях, когда какое-либо действие связано с его активацией.

Некоторые устройства имеют определенную ориентацию, которая задается различными параметрами; IOR, ORIENTATION (ориентация), ROTATION (вращение). IOR, или Индекс Ориентации, необходим для любого устройства помещенного на твердую поверхность. Величины  $\pm 1$  или  $\pm 2$  или  $\pm 3$  обозначают направление, в котором «смотрит» устройство, где 1 параллельна оси X, 2 параллельна оси Y, а 3 параллельна оси Z.

Ориентация (ORIENTATION) применяется для устройств, не расположенных на поверхности, и требует заданного точного направления – например, спринклер. Ориентация (ORIENTATION) определяется тремя числами, которые задают составляющие направляющего вектора. Значение ориентации (ORIENTATION) по умолчанию составляет (0,0,-1).

Например, противопожарный спринклер, направленный вниз по умолчанию, может быть перенаправлен. Если предписать:

```
&DEVC XYZ=3.0,5.6,2.3, PROP_ID='...', ID='...', ORIENTATION=1,0,0 /
```

тогда спринклер будет указывать в положительном направлении *x*. Что касается других устройств, ориентация (ORIENTATION) только изменит вид, в каком устройство будет нарисовано в программе Smokeview.

## 11.2 Выходные данные устройств

У каждого устройства есть характерная для него величина (QUANTITY). Выходным файлом для всех величин группы DEVC является файл ASC II (Американский стандартный код для обмена информацией) формат с разделителями-запятыми под названием CHID\_devc.csv (о формате выходного файла смотрите в Разделе 19.3.). Этот файл может быть импортирован в большую часть программных пакетов электронных таблиц. В случае если число строк DEVC превышает 256 – предел для некоторых приложений с электронными таблицами – выходной файл будет разбит на меньшие файлы соответствующего размера. Чтобы предотвратить разделение файла, необходимо задать COLUMN\_DUMP\_LIMIT=.FALSE. в строчке DUMP.

Каждое устройство должно иметь заданную величину (QUANTITY). Некоторые отдельные устройства (раздел 11.3) имеют указанную величину в строке PROP. Величина (QUANTITY), заданная в строке PROP и ассоциированная со строкой DEVC отменяет величину (QUANTITY), указанную в строке DEVC

## 11.3 Специальные устройства и их характеристики: Группа PROP (Таблица 13.16)

Многие устройства описать легко, например, точечный измеритель, обладающий лишь несколькими параметрами, которые можно занести в строку DEVC. Что же касается более сложных устройств, было бы неудобно перечислять все их свойства в каждой отдельной строке DEVC. К примеру, в смоделированной ситуации может быть задействовано несколько сотен спринклеров, но было бы слишком трудоемко перечислять свойства каждого из них. Для этих устройств рекомендуется использовать отдельную группу PROP для сохранения соответствующих параметров. Каждая строка PROP отмечается уникальным именем ID и запускается DEVC строкой PROP\_ID. ID может быть именем производителя, как 'ACME Sprinkler 123', например.

Лучший способ составить описание группы PROP - это перечислить названия специальных устройств и их свойства.

### 11.3.1 Спринклеры

Ниже следует очень простой пример спринклера:

```
&PROP ID='K-11', QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE', RTI=148., C_FACTOR=0.7,  
ACTIVATION_TEMPERATURE=74., OFFSET=0.10,PART_ID='water drops',  
FLOW_RATE=189.3, DROPLET_VELOCITY=10., SPRAY_ANGLE=30.,80. /
```

```
&DEVC ID='Spr_60', XYZ=22.88,19.76,7.46, PROP_ID='K-11' / &DEVC  
ID='Spr_61', XYZ=22.88,21.76,7.46, PROP_ID='K-11' /
```

Спринклер, известный как 'Spr\_60', расположен в точке пространства, обозначенной XYZ. Это спринклер типа 'K-11'. Его свойства прописаны в строке PROP. Обратите внимание на то, что имена устройств FDS (ID) не используются, кроме как средство для связи одного с другим, поэтому пытайтесь использовать как можно более значимые для вас имена ID. В то же время, параметр величины - QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE' имеет значение для FDS, поскольку направляет систему в расчетах времени включения устройства

с использованием стандартного алгоритма RTI (индекс времени отклика). О различных свойствах спринклера будет сказано ниже<sup>1</sup>.

Свойства спринклеров, включенные в группу PROP следующие:

RTI Индекс времени отклика исчисляется в  $\sqrt{m \cdot s}$ . (Значение по умолчанию 165.)

C\_FACTOR (Фактор\_C) исчисляется в  $\sqrt{m/s}$ . (Значение по умолчанию 0.)

ACTIVATION\_TEMPERATURE (Температура активации) исчисляется в градусах по Цельсию (значение по умолчанию 74 °C)

INITIAL\_TEMPERATURE (Исходная температура) в градусах по Цельсию (значение TMPA по умолчанию)

FLOW\_RATE (Скорость потока) исчисляется в л/мин. Как вариант можно применять

K\_FACTOR (Фактор\_K), исчисляемый в л/мин/бар<sup>1/2</sup> и OPERATING\_PRESSURE (рабочее давление), измеряемое в атмосферах. Скорость потока, таким образом, вычисляется  $m_w = K \sqrt{p}$ . Обратите внимание на то, что 1 бар эквивалентен 14.5 psi (фунт на квадратный дюйм), 1 gpm (галлон в минуту) эквивалентен 3.785 л/мин, 1 gpm (галлон в минуту)/psi (фунт на квадратный дюйм)<sup>1/2</sup> равен 14.41 литр/мин/ бар<sup>1/2</sup>.

OFFSET (радиус распыления) Радиус сферы (в метрах) вокруг спринклера, в пределах которого капли воды изначально распределяются при моделировании. Предполагается, что, попадая в радиус распыления (OFFSET) и оказавшись за его пределами, капли воды разделяются и переносятся независимо друг от друга. (По умолчанию 0.05м)

DROPLET\_VELOCITY (скорость выброса струи) Первоначальная скорость выброса капель. (По умолчанию 5 м/с)

SPRAY\_ANGLE (угол распыления струи) пара углов (в градусах), между которыми распыляются капли воды. Эти углы очерчивают конусообразную форму распыла, относящуюся к южному полюсу сферы, центром которой является спринклер, с радиусом отверстия (OFFSET). Например, угол распыления струи равный 30.,80 (SPRAY\_ANGLE=30.,80) направляет капли воды, покидающие спринклер, в диапазоне 60 ° и 10 ° градусов южной широты, при условии, что направление спринклера установлено по умолчанию (0,0,-1), тогда капли воды будут равномерно распределяться в этих пределах.

SPRAY\_PATTERN\_TABLE (Таблица форм распыла) Название ряда строк TABL, содержащих описание формы распыла.

PART\_ID Название строки PART, содержащей свойства капель. Более подробно смотрите в Разделе 10.

Известно, что спринклеры выпускают множество капель воды, которым необходимо задать направление. Чтобы ограничить нагрузку, капли спринклера исчезают при столкновении с

---

<sup>1</sup> В предшествующих версиях FDS свойства данного спринклера хранились в отдельном файле. Этот файл больше не используется

нижней границей вычислительного домена, независимо от ее степени твердости. Чтобы запретить FDS удаление капель воды с нижней границы вычислительного домена, добавьте фразу `POROUS_FLOOR=.FALSE.` к строке `MISC` (Раздел 6.4). Необходимо помнить, что капли воды, достигающие поверхности пола, продолжают горизонтальное движение в произвольных направлениях; отскакивая от препятствий и затрачивая время CPU.

Дополнительная информация о спринклерах, их подключении и динамике распыления находится в «Техническом справочнике FDS» [1]

### **Дополнительный вопрос: Сложные формы распыла**

В случаях, когда требуется более сложная форма распыла, чем та, что достигается при помощи `SPRAY_ANGLE` (угол распыления струи), `VELOCITY` (скорость выброса струи), and `FLOW_RATE` (скорость потока), можно задать `SPRAY_PARTTERN_TABLE` (таблица форм распыла), используя группу `TABL` (раздел 8.5). Для определения формы распыла, задайте величину полного расхода, используя `FLOW_RATE` (скорость потока) в строке `PROP`, наименование формы распыла, используя `SPRAY_PARTTERN_TABLE` (таблицу форм распыла) и затем одну или несколько строк `TABL` данного формата:

```
&TABL ID='table_id', TABLE_DATA=LAT1,LAT2,LON1,LON2,VELO,FRAC /
```

Где каждая строка `TABL` для данного имени `'table_id'` сообщает о сферическом распределении формы распыла для определенного пространственного угла. `LAT1` (Широта 1) и `LAT2` (Широта 2) представляют собой границы объемного угла, измеряемого в градусах от южного полюса (0 - южный полюс, 90 – экватора, 180 – северный полюс). Заметьте, что это не совсем общепринятый способ обозначения широты, но довольно удобная система, основанная на свойстве типичного противопожарного спринклера разбрызгивать воду по направлению вниз, поэтому 0 градусов отмечает «южный полюс», или – направление z. Параметры `LON1` (долгота 1) и `LON2` (долгота 2) – это границы телесного угла (также в градусах), где 0 (или 360) располагается на оси x, а 90 на оси y. `VELO` обозначает скорость выброса капель на входе (в м/с). `FRAC` – доля полного расхода жидкости, которая выделяется внутри данного телесного угла.

В нижеследующем примере, форма распыла очерчена двумя струями, каждая из которых направляется со скоростью 10 м/с и расходом 20 л/мин (суммарный расход составляет 40 л/мин и доля каждой струи 0.5). Центр каждой струи проходит через точки 45 ° ниже «экватора», и разделяются на 180°

```
&PROP ID='y-pipe',  
    QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE', FLOW_RATE=40.,  
    PART_ID='water_drops',  
    SPRAY_PATTERN_TABLE='TABLE1' /
```

```
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=40,50, 85, 95,10,0.5 /  
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=40,50,185,195,10,0.5 /
```

Обратите внимание, что каждая последовательность строк `TABL` должна содержать уникальный код ID. Специальные требования по упорядочиванию строк будут зависеть от типа `TABL`, и эти требования изложены в соответствующем разделе данного руководства. Также заметьте, что строки `TABL` могут быть заданы в любом порядке.

### 11.3.2 Распылители

Распылители очень напоминают спринклеры, только они не срабатывают по стандартной модели RTI (индекс времени отклика). Чтобы смоделировать включение распылителя в определенное время, задайте QUANTITY (величину) и SETPOINT (заданное значение) напрямую в строку DEVC. Модель распылителя можно найти в примере верификации **water\_fuel\_sprays.fds**

В следующих строках:

```
&DEVC XYZ=23.91,21.28,0.50, PROP ID='nozzle', ORIENTATION=0,0,1, QUANTITY='TIME',  
      SETPOINT=0., ID='noz 1' /  
&DEVC XYZ=26.91,21.28,0.50, PROP_ID='nozzle', ORIENTATION=0,0,1, QUANTITY='TIME',  
      SETPOINT=5., ID='noz 2' /  
&PROP ID='nozzle', PART_ID='heptane drops', FLOW_RATE=2.132,  
      FLOW_TAU=-50., DROPLET_VELOCITY=5., SPRAY_ANGLE=0.,45. /
```

обозначены два распылителя одного типа, один из которых срабатывает в промежуток 0 секунд, другой – в 5 секунд. Обратите внимание, что в случае с распылителями должна быть указана общая строка PROP. Параметр PART\_ID дает FDS команду распылять капли жидкости.

### 11.3.3 Тепловые датчики

QUANTITY='LINK TEMPERATURE' (величина='температура звена') как показано в следующем примере, задает настройки для теплового датчика, который действует по точно такому же алгоритму, что и спринклер, не оснащенный разбрызгивателем.

```
&DEVC ID='HD_66', PROP_ID='Acme Heat', XYZ=2.3,4.6,3.4 /  
&PROP ID='Acme Heat', QUANTITY='LINK TEMPERATURE', RTI=132.,  
ACTIVATION_TEMPERATURE=74. /
```

Как и в примере со спринклером, алгоритм RTI обозначает индекс времени отклика в единицах  $\sqrt{m \cdot s}$ . ACTIVATION\_TEMPERATURE – представляет собой показатель температуры активации звена в градусах по Цельсию (значение по умолчанию 74 °C.) INITIAL\_TEMPERATURE (исходная температура) в градусах по Цельсию (значение по умолчанию TMPA)

### 11.3.4 Датчики дыма

Параметры датчика дыма во входном файле задаются следующим образом:

```
&DEVC ID='SD_29', PROP_ID='Acme Smoke Detector', XYZ=2.3,4.6,3.4 /  
&PROP ID='Acme Smoke Detector', QUANTITY='spot obscuration', LENGTH=1.8,  
ACTIVATION_OBSCURATION=3.28 /
```

для однопараметрической модели Хескестада. Обратите внимание, что строка PROP обязательна для датчиков дыма, таким образом, QUANTITY (величина) DEVC может быть задана в строке PROP. В случае с четырехпараметрической моделью Клиэри используется строка PROP:

```
&PROP ID='Acme Smoke Detector', QUANTITY='spot obscuration', ALPHA_C=1.8, BETA_C=-  
1.1,  
      ALPHA_E=0.98, BETA_E=-0.77, ACTIVATION_OBSCURATION=3.28 /
```

в которой два показателя времени заполнения или времени «задержки» представлены в виде:

$$\delta t_e = \alpha_e u^{\beta_e} ; \delta t_c = \alpha_c u^{\beta_c} \quad (11.1)$$

Значения параметров датчиков для модели Хескестада выставлены по умолчанию: LENGTH (характерическая длина) составляет 1.8 м. Все значения ALPHA и BETA должны быть точно указаны для модели Клиэри. Рекомендованные константы для неопределенных ионизационных детекторов и фотоэлементов представлены в Таблице 11.1. ACTIVATION\_OBSCURATION (пороговое затемнение) – это пороговое значение в %/м. Порог, как правило, устанавливается согласно настройкам производителя. Его значение по умолчанию составляет 3.28 %/м (1%/фут).

Таблица 11.1.: **Рекомендованные значения для модели датчика дыма. Смотрите ссылку [6] для других устройств.**

Detector (Датчик)	$\alpha_e$	$\beta_e$	$\alpha_c, L$	$\beta_c$
Cleary Ionization I1	2.5	-0.7	0.8	-0.9
Cleary Ionization I2	1.8	-1.1	1.0	-0.8
Cleary Photoelectric P1	1.8	-1.0	1.0	-0.8
Cleary Photoelectric P2	1.8	-0.8	0.8	-0.8
Heskestad Ionization	—	—	1.8	—

### 11.3.5 Протяженные системы обнаружения

Для настройки дымового оптического линейного датчика необходимо задать конечные точки  $(x1,y1,z1),(x2,y2,z2)$ , используя XB, и общий процент затемнения, при котором активируется датчик. Эти две конечные точки должны находиться в пределах одной сетки. FDS определяет, какие из ячеек сетки находятся на траектории, заданной двумя точками. Срабатывание дымового оптического линейного датчика вычисляется так:

$$\text{Затемнение} = \left( 1 - \exp \left( - K_m \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{soot,i} (t - t_{d,i}) m_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \right) \right) \times 100\% / m \quad (11.2)$$

где  $i$  – это ячейка сетки на пути луча,  $\rho_{soot,i}$  степень концентрации сажи в ячейке сетки, а  $\Delta x_i$  обозначает расстояние внутри сетки, пройденное лучем.

&DEVC XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2, QUANTITY='path obscuration', ID='beam1', SETPOINT=0.33 /

### 11.3.6 Аспирационная система обнаружения

Аспирационная система обнаружения объединяет ряд устройств для измерения уровня сажи. Аспирационная система обнаружения состоит из трубопроводной сети, осуществляющей забор воздуха из ряда помещений в центральную точку, где измеряется степень затемнения. Чтобы задать такую систему в FDS, необходимо обозначить помещения, где будет производиться забор воздуха, скорость потока отобранного воздуха, время переноса воздуха из каждого из помещений, и, в случае, когда предусматривается выход на сигнализацию, общую установку затемнения. Для обозначения деталей помещений используется одна или более строк DEVC и одна дополнительная строка ввода для установки центрального детектора:

```
&DEVC XYZ=..., QUANTITY='soot density', ID='soot1', DEVC_ID='asp1', FLOWRATE=0.1, DELAY=20 /
&DEVC XYZ=..., QUANTITY='soot density', ID='soot2', DEVC_ID='asp1', FLOWRATE=0.2, DELAY=10 /
&DEVC XYZ=..., QUANTITY='soot density', ID='sootN', DEVC_ID='asp1', FLOWRATE=0.3, DELAY=30 /
&DEVC XYZ=..., QUANTITY='aspiration', ID='asp1', BYPASS_FLOWRATE=0.4, SETPOINT=0.02 /
```

где DEVC\_ID используется для каждой точки забора воздуха, чтобы связать их с центральным детектором, FLOWRATE (скорость потока) – это скорость перемещения газа в кг/сек, DELAY (задержка) во времени перемещения (в секундах) от точки забора воздуха до центрального детектора, BYPASS\_FLOWRATE (скорость обходного потока) – показатель (в кг/сек) скорости потока воздуха, затянутого в систему извне вычислительного домена (отвечает за части сети, осуществляющей забор воздуха вне домена и настраиваемые через строку MESH), и SETPOINT (заданное значение; установки) - предельная степень потемнения воздуха, при которой срабатывает устройство сигнализации в %/м. Выходной сигнал аспирационной системы обнаружения вычисляется таким образом:

$$\text{Затемнение} = \left( 1 - \exp \left( - K_m \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{\text{soot},i} (t - t_{d,i}) m_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \right) \right) \times 100\% / m \quad (11.3)$$

где  $m_i$  – массовый расход воздуха (mass FLOWRATE) для помещения под номером  $i$ ,  $\rho_{\text{soot},i} (t - t_{d,i})$  обозначает уровень концентрации сажи в помещения под номером  $i$ , показатель  $t_{d,i}$  (DELAY (задержка)), предшествующий показателю текущего времени  $t$ , и  $K_m$  - MASS\_EXTINCTION\_COEFFICIENT (массовый коэффициент экстинкции) связанный с видимым светом.

### 11.4 Основные логические схемы

Устройства используются для управления различными действиями, такими, как создание или устранение препятствий, или приведение в действие и отключение вентиляторов и вентиляционных отверстий. Каждое устройство характеризуется определенной величиной (QUANTITY), которая задается либо напрямую в строку DEVC, либо опосредованно в дополнительную строку PROP. Используя параметр SETPOINT в строке DEVC, можно инициировать срабатывание устройства, в случае, когда значение величины (QUANTITY) превышает, или становится ниже заданной установки параметра SETPOINT (установка). Выбор диктуется заданным параметром TRIP\_DIRECTION (направление пути), который представляет собой положительное или отрицательное целое число. Следующие параметры предписывают способ, которым устройство будет контролировать действие:



SETPOINT (установка) – числовое значение устройства, при котором изменяется его состояние. Для детекторных устройств (к примеру, тепловых датчиков или датчиков дыма) эта величина задается в строке PROP и не должна указываться в строке DEVC.

TRIP\_DIRECTION (направление изменения) Положительное число означает, что состояние устройства изменится, когда его показатель превысит заданную установку, а отрицательное число означает, что состояние устройства изменится, когда его показатель упадет ниже заданной установки. Значение по умолчанию +1.

LATCH (триггер) Если установить это логическое значение на .TRUE. ("истина"), устройство изменит режим работы только однажды. Значение по умолчанию .TRUE. ("истина").

INITIAL\_STATE (исходное состояние) Данный логический параметр задает начальное состояние устройства. Значение по умолчанию .FALSE. ("ложь"). Например, если Препятствие, ассоциированное с устройством, должно исчезнуть, задайте INITIAL\_STATE=.TRUE.

Если необходимо использовать более сложную логику, нужно задать функции управления в строку CTRL. Смотрите раздел 11.5 для дальнейшей информации о функциях CTRL. Простейшим примером устройства служит таймер:

```
&DEVC XYZ=1.2,3.4,5.6, ID='my clock', QUANTITY='TIME', SETPOINT=30. /
```

Все, что ассоциировано с данным устройством через параметр, DEVC\_ID='my clock' изменит его состояние через 30 секунд. К примеру, если добавить текст в строку OBST, это препятствие изменится с INITIAL\_STATE (исходного состояния) .FALSE. ("ложь") на .TRUE. ("истина") через 30 секунд. Другими словами, оно будет создано через 30 секунд, а не с момента начала моделирования. Это простой способ открыть дверь или окно.

#### ***11.4.1 Создание и устранение препятствий***

Во многих сценариях пожара, открывание или закрывание двери или окна может привести к существенным изменениям в ходе пожара. В отдельных случаях такие действия предпринимаются намеренно, а иногда в результате пожара. В рамках расчетов FDS, эти действия выполняются через создание или устранение твердых препятствий, или открывание или закрывание внешних вентиляционных отверстий.

Чтобы устранить или создать твердое препятствие, присвойте строке символов DEVC\_ID имя DEVC ID в строке OBST, которую нужно создать или удалить. Это задаст задачу FDS устранить или создать препятствие, когда устройство изменит режим работы на .FALSE. ("ложь") на .TRUE. ("истина"), соответственно. Например, строки

```
&OBST XB=..., SURF_ID='...', DEVC_ID='det2' /  
.  
.  
&DEVC XYZ=..., PROP_ID='...', ID='det1' /  
&DEVC XYZ=..., PROP_ID='...', ID='det2', INITIAL_STATE=.TRUE. /
```

ставят задачу устранить препятствие, когда изменится режим работы обозначенного DEVC.

Заметьте, что, в то время как отдельный DEVC можно использовать, чтобы управлять множеством элементов, DEVC, который используется в качестве HOLE (отверстие) не должен использоваться для других целей, кроме как для дополнительных HOLE

(отверстий).

Создание или устранение твердого препятствия в заданное время может быть выполнено с использованием DEVC, в котором TIME (время) выступает как его измеряемая величина. К примеру, следующие команды ставят задачу для определенных HOLE (отверстий) и OBST (препятствий) появиться/исчезнуть в различное обозначенное время:

```
&HOLE XB=0.25,0.45,0.20,0.30,0.20,0.30,      COLOR='RED',   DEVC_ID='timer  1' /
&HOLE XB=0.25,0.45,0.70,0.80,0.70,0.80,      COLOR='GREEN', DEVC_ID='timer  2' /
&OBST XB=0.70,0.80,0.20,0.30,0.20,0.30,      COLOR='BLUE',  DEVC_ID='timer  3' /
&OBST XB=0.70,0.80,0.60,0.70,0.60,0.70,      COLOR='PINK',  DEVC_ID='timer  4' /

&DEVC XYZ=..., ID='timer  1', SETPOINT= 1, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE./
&DEVC XYZ=..., ID='timer  2', SETPOINT= 2, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.TRUE./
&DEVC XYZ=..., ID='timer  3', SETPOINT= 3, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE./
&DEVC XYZ=..., ID='timer  4', SETPOINT= 4, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.TRUE./
```

Синее препятствие появляется через 3 секунды, поскольку его исходное состояние «ложь» (false), то есть, изначально его не существует. Розовое препятствие исчезает в 4 секунды, так как изначально оно существует. Красное отверстие создается в 1 секунду, поскольку изначально его не существует (оно заслонено красным препятствием). Зеленое отверстие заслоняется при отметке 2 секунды, поскольку изначально оно не существует (как отверстие).

**Рекомендуем всегда начинать с простых примеров, прежде чем переходить на сложные схемы создания/устранения препятствий и отверстий.**

**Чтобы устранить препятствие, а затем снова создать другое вместо него, используйте две строки**

```
&OBST XB=..., SURF_ID='whatever', DEVC_ID='device 1' /
&OBST XB=..., SURF_ID='whatever', DEVC_ID='device 2' /
```

так как код распознает их как два разных препятствия.

До дальнейшего уведомления не рекомендуется создавать или устранять препятствие, которое ограничивает «зону давления» (см. раздел 8.3), по той причине, что резкие изменения давления могут вызвать неустойчивость численного решения.

#### **11.4.2 Включение и отключение вентиляционных отверстий**

Если устройство или функция управления применяется к VENT (вентиляционное отверстие), оно включает/выключает любую временную зависимость, предписанную параметру VENT посредством SURF\_ID. К примеру, чтобы управлять вентилятором при помощи устройства 'det2' введите следующие строки:

```
&SURF ID='FAN', VOLUME_FLUX=5. /
&VENT XB=..., SURF_ID='FAN', DEVC_ID='det2' /
&DEVC ID='det2', XYZ=..., QUANTITY='TIME', SETPOINT=30.,INITIAL_STATE=.FALSE. /
```

Заметьте, что на отметке 30 секунд, «состояние» вентилятора ('FAN') изменяется с .FALSE. («ложь») на .TRUE. («истина»), другими словами, вентилятор включается. Поскольку вентилятору 'FAN' не присвоена точная временная функция, его переходный переход (1 секунда) в рабочий режим начнется в 30 секунд, вместо 0 секунд.

В данном примере: INITIAL\_STATE=.TRUE. вентилятор «деактивируется» в 30 секунд. «Активация» вентиляционного отверстия (VENT) в обязательном порядке откладывает все остальные временные функции до тех пор, пока не будет достигнута SETPOINT (установка)

устройства. «Деактивация» вентиляционного отверстия (VENT) отключает все временные функции.

До дальнейшего уведомления не рекомендуется активировать или деактивировать 'MIRROR' (зеркальный вентиляционный канал) 'OPEN' (открытый), поскольку резкие изменения давления могут вызвать неустойчивость численного решения.

### 11.5 Расширенные функции управления: Группа CTRL

Существует множество систем, функциональные возможности которых невозможно описать простым устройством с единичной «установкой». Рассмотрим, к примеру, типичную систему отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC). Она контролируется термостатом, которому задана температура. Эта система включается, когда температура опускается ниже установленной, а затем выключается, когда температура поднимается выше установленной. Такой характер изменения невозможно задать, обозначив только единственную установку, необходимо определять диапазон или «мертвую зону» установки, и будет ли система активирована при возрастающей или снижающейся температуре. В примере с системой отопления, вентиляции и кондиционирования, пересечение нижнего предела зоны нечувствительности приводит в действие нагревание; пересечение верхнего предела включает охлаждение.

В то время как HVAC не является основной целью FDS, существует множество ситуаций, в которых отклик системы при пожаре нетривиален. Чтобы задать эти более сложные линии поведения, используется ввод в строку CTRL. Входными данными элемента управления являются выходные данные одного/нескольких устройств/элементов управления. Таким образом, сложные линии поведения могут быть смоделированы путем преобразования одних функций в другие. Для большинства типов элементов управления выходные значения устройств и функций контроля и время последнего изменения их состояния используются как входные данные.

Таблица 11.2: Типы контрольных функций для CTRL

Тип функции	Описание
ANY (любые)	Изменяет режим, если <u>любой из</u> INPUT (входные данные) являются .TRUE. («истина»)
ALL (все)	Изменяет режим, если <u>все</u> INPUT (входные данные) являются .TRUE. («истина»)
ONLY (только)	Изменяет режим, если и <u>только</u> если N штук INPUT (входные данные N) являются .TRUE. («истина»)
AT_LEAST (по меньшей мере)	Изменяет режим, если, по меньшей мере, N штук INPUT (входные данные N) являются .TRUE. («истина»)
TIME_DELAY (задержка во времени)	Изменяет режим DELAY (задержка) после того, как INPUT (входные данные) становятся .TRUE. («истина»)
CUSTOM (специальный)	Изменяет режим в зависимости от оценки параметра RAMP входной функции
DEADBAND «мертвая зона»	Работает как термостат
KILL (уничтожение процесса)	Завершает расчет, если один из его INPUT (входные данные) является .TRUE. («истина»)
RESTART	Выводит файлы перезапуска, если один из входных данных (INPUT)

(Перезапуск)	является .TRUE. («истина»)
--------------	----------------------------

Элемент управления помечается параметром ID. Входные данные элемента задаются параметром INPUT\_ID. К параметру INPUT\_ID переходит одна или более строк от устройств или других элементов управления.

При необходимости разработать систему элементов управления и устройств, которая включала бы многократные изменения режимов работы, добавьте свойство LATCH=.FALSE. («ложь») в соответствующие строки DEVC или CTRL. по умолчанию устройства и элементы управления могут изменять режим работы только один раз, например, включение спринклера или сигнала тревоги датчика дыма. LATCH=.TRUE. («истина») задано по умолчанию, как для устройств, так и для элементов управления.

### **11.5.1 Функции управления: ANY (любые), ALL (все), ONLY (только) и AT\_LEAST (по меньшей мере)**

Предположим, что вы желаете устранить препятствие (заставить дверь открыться, например) после того, как сработал один из четырех датчиков дыма. Введите строки по образцу:

```
&OBST XB=..., SURF_ID='...', CTRL_ID='SD' /
```

```
&DEVC XYZ=1,1,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_1' /
```

```
&DEVC XYZ=1,4,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_2' /
```

```
&DEVC XYZ=4,1,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_3' /
```

```
&DEVC XYZ=4,4,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_4' /
```

```
&CTRL ID='SD', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='SD_1','SD_2','SD_3','SD_4',
```

```
INITIAL_STATE=.TRUE. /
```

Исходное состояние (INITIAL\_STATE) функции контроля SD является .TRUE. («истина»), что подразумевает, что изначально препятствие существует. «Изменение состояния» (“change of state”) означает, что препятствие исчезает, когда какой-либо из датчиков срабатывает. По умолчанию исходное состояние (INITIAL\_STATE) элемента управления SD является .FALSE. («ложь») – это означает, что изначально препятствия не существует.

Предположим, что вы желаете создать препятствие (заставить дверь зарыться, например) после того, как сработали все четыре датчика дыма. Введите командную строку таким образом:

```
&CTRL ID='SD', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='SD_1','SD_2','SD_3','SD_4' /
```

Функции контроля AT\_LEAST (по меньшей мере) и ONLY (только) представляют собой всего лишь обобщения ANY (любой) и ALL (все).

К примеру,

```
&CTRL ID='SD', FUNCTION_TYPE='AT_LEAST', N=3, INPUT_ID='SD_1','SD_2','SD_3','SD_4' /
```

переходит из режима .FALSE. («ложь») в .TRUE. («истина»), когда срабатывают, по меньшей мере, 3 датчика.

Заметьте, что в данном примере и в следующем примере параметр N используется для обозначения числа задействованных или .TRUE. («истина») входных устройств, отвечающих условиям функции контроля.

Элемент управления

```
&CTRL ID='SD', FUNCTION_TYPE='ONLY', N=3, INPUT_ID='SD_1','SD_2','SD_3','SD_4' /
```

изменяет режим .FALSE. («ложь») на .TRUE. («истина»), когда срабатывают 3, и только 3, датчика.

### 11.5.2 Функции контроля: *TIME\_DELAY* (задержка во времени)

Моменту активации устройства часто предшествует задержка во времени, как в случае с "сухотрубной" спринклерной системой.

```
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Sprinkler_link', QUANTITY='LINK TEMPERATURE',  
ID='Spk_29_link', CTRL_ID='dry pipe' /  
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Sprinkler', QUANTITY='CONTROL', ID='Spk_29',  
CTRL_ID='dry pipe' /  
&CTRL ID='dry pipe', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY', INPUT_ID='Spk_29_link',  
DELAY=30. /
```

Такая взаимосвязь спринклера с его трубами обозначает, что спринклер контролируется (в данном случае с задержкой) *сухой трубой*, которая откладывает время включения спринклера Spk\_29 на 30 секунд. Время, когда вода достигнет выхода распылителя, измеряется Spk\_29\_link.

### 11.5.3 Функции контроля: *DEADBAND* («мертвая зона»)

В примере с HVAC, следующие строки ввода установят простой термостат:

```
&SURF ID='FAN', TMP_FRONT=40., VOLUME_FLUX=-1. /  
&VENT XB=-0.3,0.3,-0.3,0.3,0.0,0.0, SURF_ID='FAN', CTRL_ID='thermostat' /  
&DEVC ID='TC', XYZ=2.4,5.7,3.6, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&CTRL ID='thermostat', FUNCTION_TYPE='DEADBAND', INPUT_ID='TC',  
ON_BOUND='LOWER', SETPOINT=23.,27.,LATCH=.FALSE./
```

В данном примере контролируем вентиляционное отверстие (VENT), которое моделирует вентилятор (FAN), подающий горячий воздух в помещение. DEVC (устройство), называемое TC, расположен в помещении для измерения температуры (TEMPERATURE). Термостат приводит в действие вентилятор (FAN), в соответствии с установкой (SETPOINT), когда температура падает ниже 23 градусов по Цельсию (ON\_BOUND='LOWER') и выключается, когда температура поднимается выше 27 °C.

Отметьте, что для работы «мертвой зоны» контроллера LATCH (триггер) должна быть установлена на .FALSE. («ложь»).

### 11.5.4 Функции контроля: *RESTART* (перезапуск) и *KILL* (уничтожение процесса)

Бывают случаи, когда необходимо проводить моделирование до тех пор, пока не будет достигнута поставленная цель. Раньше это было возможно только при постоянном наблюдении выходных данных моделирования и остановке вычислений вручную, когда цель

достигнута. Применяя функцию контроля KILL (уничтожение процесса), это можно делать автоматически.

Кроме того, существуют типы исследований, в которых при желании пользователь может создать какое-либо базовое условие и выполнять многократные изменения этого условия. К примеру, при желании пользователь может запустить ряд моделей, в которых испытываются различные меры пожаротушения, когда срабатывает датчик сигнализации. Используя функцию контроля RESTART (перезапуск), пользователь может создать файл повторного запуска, как только желаемое условие достигнуто. Моделирование может продолжаться, и файлы повторного запуска могут копироваться, сопровождаясь строкой ввода CHID с указанием различных изменений (при соблюдении всех стандартных ограничений по использованию файла повторного запуска). К примеру, строки

```
&DEVC ID='temp', QUANTITY='TEMPERATURE', SETPOINT=1000., XYZ=4.5,6.7,3.6 /  
&DEVC ID='velo', QUANTITY='VELOCITY', SETPOINT=10., XYZ=4.5,6.7,3.6 /
```

```
&CTRL ID='kill', FUNCTION_TYPE='KILL', INPUT_ID='temp' /  
&CTRL ID='restart', FUNCTION_TYPE='RESTART', INPUT_ID='velo' /
```

приведут к мягкому завершению расчета и выводу данных файлов повторного запуска, когда температура в установленный момент поднимется выше 1000 °C; или просто к выводу данных файлов повторного запуска, когда скорость в установленный момент превысит 10 м/с.

#### **11.5.5 Функции контроля: CUSTOM (пользовательская)**

Для большинства типов функций контроля логические выходные данные устройств и функций контроля и время последнего изменения режима их работы принимаются за входные данные. Функция CUSTOM (пользовательская) вычисляет выходные данные функции при помощи числового параметра DEVC наряду с RAMP для определения выхода функции. Когда выходные данные RAMP отрицательны для значения параметра DEVC, параметр CTRL будет иметь свое первоначальное состояние (INITIAL\_STATE). Когда выходные данные RAMP положительны для значения параметра DEVC, параметр CTRL будет иметь противоположное значение от своего первоначального значения (INITIAL\_STATE). В следующем примере, функция CUSTOM использует в качестве входных данных числовые данные с таймеров. Функция возвращает «истина» (значение по умолчанию для первоначального состояния INITIAL\_STATE =FALSE.), когда параметр F в пилообразном сигнале обозначенный как RAMP\_ID является положительной величиной и «ложь», когда параметр RAMP F имеет отрицательное значение. В этом случае устройство начнет с «ложь» и переключится на «истина», когда таймер достигнет 60 секунд. Он останется в положении «истина» до тех пор, пока таймер не достигнет положения 120 секунд, и снова перейдет в положение «ложь».

Заметьте, что при использовании функций контроля ID, предписанные входным данным обеих групп CTRL и DEVC должны быть уникальны для каждого ряда входных данных, то есть нельзя дать одно и то же имя ID и функции контроля, и устройству.

В примере HVAC, описанном выше, мы могли бы заставить систему работать по фиксированному циклу при помощи контрольной функции CUSTOM (специальной), зависящей от времени:

```
&SURF ID='FAN', TMP_FRONT=40., VOLUME_FLUX=-1. /  
&VENT XB=-0.3,0.3,-0.3,0.3,0.0,0.0, SURF_ID='FAN', CTRL_ID='cycling timer' /
```

```

&DEVC ID='TIMER', XYZ=2.4,5.7,3.6, QUANTITY='TIME' /
&CTRL ID='cycling timer', FUNCTION_TYPE='CUSTOM, INPUT_ID='TIMER',
RAMP_ID='cycle' /
&RAMP ID='cycle', T= 59, F=-1 /
&RAMP ID='cycle', T= 61, F= 1 /
&RAMP ID='cycle', T=119, F= 1 /
&RAMP ID='cycle', T=121, F=-1 /

```

В представленном примере первоначально вентилятор будет отключен. Он включится на отметке 60 секунд, а затем выключится на отметке 120 секунд. Можно заставить препятствие появиться и исчезнуть множество раз, используя такие строки, как

```

&OBST XB=..., SURF_ID='whatever', CTRL_ID='cycling timer' /
&DEVC ID='TIMER', XYZ=..., QUANTITY='TIME' /
&CTRL ID='cycling timer', FUNCTION_TYPE='CUSTOM, INPUT_ID='TIMER',
RAMP_ID='cycle' /
&RAMP ID='cycle', T= 0, F=-1 /
&RAMP ID='cycle', T= 59, F=-1 /
&RAMP ID='cycle', T= 61, F= 1 /
&RAMP ID='cycle', T=119, F= 1 /
&RAMP ID='cycle', T=121, F=-1 /

```

В данном примере первоначально препятствие будет отсутствовать, затем появится на отметке 60 секунд, и снова устранился на отметке 120 секунд. Рекомендуется проводить опыты с такими комбинациями начиная с простых моделей, прежде чем приступить к более сложным, чтобы убедиться в правильном функционировании программы FDS.

### ***11.5.6 Комбинирование функций контроля: спринклерная система предварительного действия***

В спринклерной системе предварительного действия обычно сухие трубы спринклера заполняются водой, в случае обнаружения признаков пожара. В данном примере система обнаружения включается, когда срабатывают два из четырех датчиков тревоги. Заполнение системы трубопроводов водой занимает 30 секунд. Распылитель – это DEVC (устройство), обозначенное как 'NOZZLE 1', управляемое CTRL под названием 'nozzle trigger'. Распылитель срабатывает, только когда происходит обнаружение и проходит время задержки. Отметьте, что DEVC имеет заданное условие QUANTITY='CONTROL' (величина='контроль')

```

&DEVC XYZ=1,1,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_1' /
&DEVC XYZ=1,4,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_2' /
&DEVC XYZ=4,1,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_3' /
&DEVC XYZ=4,4,3, PROP_ID='Acme Smoker', ID='SD_4' /
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Nozzle', QUANTITY='CONTROL',
ID='NOZZLE 1', CTRL_ID='nozzle trigger' /

```

```

&CTRL ID='nozzle trigger', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='smokey','delay' /
&CTRL ID='delay', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY', INPUT_ID='smokey', DELAY=30. /
&CTRL ID='smokey', FUNCTION_TYPE='AT_LEAST', N=2,
INPUT_ID='SD_1','SD_2','SD_3','SD_4' /

```

### ***11.5.7 Комбинирование функций контроля: сухотрубная спринклерная система***

В "сухотрубной" спринклерной системе обычно сухие трубы находятся под давлением газа. Когда активируется головка спринклера, падение давления позволит воде распространиться по системе трубопровода. В этом примере заполнение трубопровода занимает 30 секунд с того момента, как активируется спринклер. Для перехода системы в рабочий режим требуется, прежде всего, чтобы активировалось любое (ANY) из ответвлений, что даст отсчет задержки в 30 секунд (TIME\_DELAY). По окончании 30-секундной задержки каждый распылитель, активировавшись за счет элемента управления ALL (все) пустит воду.

```
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Sprinkler Link', ID='LINK 1' /  
&DEVC XYZ=2,3,3, PROP_ID='Acme Sprinkler Link', ID='LINK 2' /
```

```
&PROP ID='Acme Sprinkler Link', QUANTITY='LINK TEMPERATURE',  
ACTIVATION TEMPERATURE=74., RTI=30./
```

```
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Nozzle', QUANTITY='CONTROL',  
ID='NOZZLE 1', CTRL_ID='nozzle 1 trigger' /  
&DEVC XYZ=2,3,3, PROP_ID='Acme Nozzle', QUANTITY='CONTROL',  
ID='NOZZLE 2', CTRL_ID='nozzle 2 trigger' /
```

```
&CTRL ID='check links', FUNCTION_TYPE='ANY', INPUT_ID='LINK 1','LINK 2'/
```

```
&CTRL ID='delay', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY', INPUT_ID='check links', DELAY=30. /
```

```
&CTRL ID='nozzle 1 trigger', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='delay','LINK 1'/
```

```
&CTRL ID='nozzle 2 trigger', FUNCTION_TYPE='ALL', INPUT_ID='delay','LINK 2'/
```



## Глава 12

### Выходные данные

Перед началом вычислений тщательно продумайте, какую информацию нужно сохранить. Все выходные величины должны быть указаны в начале вычислений. В большинстве случаев нельзя будет восстановить информацию после окончания расчета, если она не была указана в самом начале. Есть несколько различных способов визуализации результатов вычислений. Наиболее привычный экспериментаторам – сохранить заданную величину в отдельной точке пространства, чтобы эта величина могла быть представлена как функция времени, например, измерение температуры термопарой. Группа DEVC, описанная выше, служит для задания локальных измерений.

Чтобы лучше визуализировать схемы потоков, сохраните плоские слои данных в газовой либо в твердой фазе с помощью групп SLCF (SLiCe File) или BNDF (BouNDary File). Оба эти выходных формата позволяют вам динамически изобразить эти величины.

Получить статические изображения поля течения можно с помощью файлов PLOT3D, которые создаются 5 раз за один прогон. Формат PLOT3D используется многими программами как простой способ сохранения обозначенных величин по всей сетке через некоторый промежуток времени.

Наконец, частицы-индикаторы могут быть введены в поле течения из вентиляционных отверстий или препятствий, а затем отображаться в Smokeview. С помощью группы PART контролируйте скорость введения, частоту выборки и другие параметры, относящиеся к частицам.

Помните, что в отличие от первой версии FDS частицы больше не нужны для того, чтобы ввести тепло в поток, т.е. они автоматически не вводятся с горящих поверхностей.

### 12.1 Параметры управления выходными данными: группа DUMP

Группа DUMP содержит параметры (Таблица 13.5), которые контролируют периодичность записи выходных файлов, а также другие глобальные параметры, связанные с выходными файлами. Эта группа – новинка в FDS 5, хотя в предыдущих версиях ее параметры задавались через другие группы.

**NFRAMES** Сколько раз в процессе расчета будут записываться данные. По умолчанию 1000. Данные об устройстве, частицах, изоповерхности, 3D данные о дыме, границе, профиле твердой фазы и управляющей функции сохраняются каждые  $(T\_END - T\_BEGIN) / NFRAMES$  секунд, если другое не задано с помощью параметров DT\_DEVC, DT\_SLCF, DT\_PART, DT\_ISOF, DT\_BNDF, DT\_PROF или DT\_CTRL. Имейте в виду, что выход Smoke3D контролируется DT\_SLCF. DT\_HRR контролирует выведение данных скорости выделения тепла и связанных величин.

**MASS\_FILE** Если задан как .TRUE., создается выходной файл с массами всех газообразных веществ как функция времени. По умолчанию стоит .FALSE., потому что расчет всех газообразных веществ во всех ячейках сетки занимает много времени. Параметр DT\_MASS контролирует частоту сохранения выходных данных.

**MAXIMUM\_DROPLETS** Максимальное количество лагранжевых частиц, которые могут быть включены в любую сетку в любое заданное время. (По умолчанию 500000)

SMOKE3D Если стоит `.FALSE.`, не будет динамического воспроизведения дыма и огня. По умолчанию стоит `.TRUE.`

FLUSH\_FILE\_BUFFERS По умолчанию каждые 10 шагов по времени FDS чистит буферы выходных файлов и заставляет данные записываться в соответствующие выходные файлы. Чтобы отменить это, задайте этот параметр как `.FALSE.`

## 12.2 Опции выхода

### 12.2.1 Устройства для точечных измерений

Для многих распространенных измерительных устройств не надо привязывать определенную строку PROP к элементу DEVC. В этих случаях с помощью символьной строки QUANTITY покажите, что определенная величина газообразного или твердого состояния в некой точке должна записываться в выходном файле с суффиксом `_devc.csv`. Величины перечислены в таблице 12.1. Многие из величин газообразного состояния говорят сами за себя. Например, если вы просто хотите записать временную зависимость температуры в заданной точке, вставьте

```
&DEVC XYZ=6.7,2.9,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='T-1' /
```

и в выходной файл будет добавлена колонка `CHID_devc.csv` под названием «T-1». В этом случае ID не выполняет никакой другой роли, кроме обозначения колонки в выходном файле. Помните, что в версиях FDS до 5 была линейная интерполяция из 8 ячеек для заданного точечного измерения в газовой фазе. Другими словами, если вы обозначили точку действительными числами XYZ, FDS рассчитывал значение величины, линейно интерполировав значения в центрах 8 ближайших ячеек. Начиная с FDS 5 так больше не делается. Вместо этого FDS передает значение QUANTITY той ячейки, где расположена точка XYZ.

Прописывая величины твердой фазы, убедитесь, что датчик расположен на твердой поверхности. Не всегда видно, где находится твердая поверхность, так как сетка может не соответствовать заданному расположению препятствий. Чтобы было легче расположить соответствующую поверхность, параметр IOR *должен* быть включен при обозначении величины твердой фазы. Если направление твердой поверхности положительное  $x$ , `IOR=1`, отрицательное  $x$  – `IOR=-1`, положительное  $y$  – `IOR=2`, отрицательное  $y$ , `IOR=-2`, положительное  $z$  – `IOR=3`, а отрицательное  $z$  – `IOR=-3`. Все еще есть моменты, когда FDS не может определить, какая твердая поверхность обозначается, в этом случае в диагностическом выходном файле появляется сообщение об ошибке. Поместите образец в другое место и попробуйте еще раз. Например, строка

```
&DEVC XYZ=0.7,0.9,2.1, QUANTITY='WALL_TEMPERATURE', IOR=-2, ID='...' /
```

обозначает температуру поверхности стены, выходящей на отрицательное направление  $y$ .

### 12.2.2 Интегрированные (неточечные) измерительные приборы

Помимо точечных измерений с помощью группы DEVC можно представлять интегрированные величины (см. таблицу 12.1). Например, необходимо узнать поток массы через дверь или окно. Чтобы это получить, впишите строку

```
&DEVC XB=0.3,0.5,2.1,2.5,3.0,3.0, QUANTITY='MASS FLOW', ID='whatever' /
```

Обратите внимание, что в этом случае описывается плоскость, а не точка. Для этой цели используются XB. Заметьте, что, если нужен поток, две из шести координат должны быть одинаковыми. С помощью другого QUANTITY, HRR, можно вычислить общую скорость выделения тепла внутри под-домена. В этом случае XB должен определить объем, а не плоскость. Указание плоскости или объема, в котором будет происходить интеграция, можно сделать только с помощью XB – избегайте плоскостей или объемов, которые пересекают границы составной сетки. FDS должна выбрать сетку для интеграции, и она выбирает самую мелкую, которая частично накладывается на центростроби обозначенной плоскости или объема.

### 12.2.3 Выходная статистика

У устройства (DEVC) есть полезная функция – указание выходной величины вместе с требуемой статистикой. Например,

```
&DEVC XYZ=2.3,4.5,6.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='whatever', STATISTICS='MAX'
```

заставляет FDS выписать максимальную температуру газовой фазы на всей сетке, содержащей точку XYZ. Обратите внимание, что максимум вычисляется не по всему вычислительному домену, а только по определенной сетке. Другие STATISTICS включают «MIN» и «MEAN». Их можно применять к выходным величинам как газовой фазы, так и твердой. В случае с твердыми телами указание SURF\_ID ограничивает поиск только этими поверхностями. Пользуйтесь функцией STATISTICS с осторожностью, потому что от FDS требуется вычислять заданную величину во всех ячейках газовой или твердой фазы.

#### VOLUME MEAN

Для заданной выходной величины газообразной фазы,  $f(x,y, z)$ , STATISTICS='VOLUME MEAN' составляет дискретный аналог выражению

$$\frac{1}{V} \int \phi(x, y, z) dx dy dz \quad (12.1)$$

которое очень похоже на 'MEAN', но оно взвешивает значения в соответствии с относительным размером ячейки. Обратите внимание, что эта статистика относится только к величинам газовой фазы.

#### MASS MEAN

Для заданной выходной величины газообразной фазы,  $f(x,y, z)$ , STATISTICS=' MASS MEAN' составляет дискретный аналог выражению

$$\frac{\int \phi(x, y, z) dx dy dz}{\int p dx dy dz} \quad (12.2)$$

которое очень похоже на 'VOLUME MEAN', но оно взвешивает значения в соответствии с относительным массой ячейки. Обратите внимание, что эта статистика относится только к величинам газообразной фазы.

#### VOLUME INTEGRAL

Для заданной выходной величины газовой фазы,  $f(x,y, z)$ , STATISTICS='VOLUME INTEGRAL' составляет дискретный аналог выражения

$$\int \phi(x, y, z) dx dy dz \quad (12.3)$$

Обратите внимание, что эта статистика относится только к величинам газовой фазы, особенно к тем, которые измеряются в  $m^{-3}$ . Например, скорость выделения тепла на единицу объема – подходящая выходная величина.

#### SURFACE INTEGRAL

Для заданной выходной величины газовой фазы,  $\phi$ , STATISTICS='SURFACE INTEGRAL' составляет дискретный аналог выражения

$$\int \phi dA \quad (12.4)$$

Обратите внимание, что эта статистика относится только к величинам твердой фазы, особенно к тем, которые измеряются в  $m^{-2}$ . Например, разные тепловые потоки и потоки массы – подходящие выходные величины.

#### 12.2.4 Величины внутри твердых тел: группа PROF

FDS использует мелкую неоднородную одномерную сетку в каждой граничной ячейке для вычисления передачи тепла внутри твердого тела. Параметры (таблица 13.15) для указания заданного PROFILE сходны с параметрами для указания поверхностной величины в группе DEVC. XYZ обозначает тройку координат, QUANTITY – это физическая величина для контроля, IOR – направление, а ID – идентификационная символьная строка. Ниже приведен пример применения этой функции для получения временной зависимости температурных кривых внутри заданного твердого препятствия:

```
&PROF XYZ=..., QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TU1SA_FDS', IOR=3 /
```

Возможны другие величины – общая плотность стены (QUANTITY = 'DENSITY') или плотность компонентов твердых материалов (QUANTITY = 'MATL\_ID'), где MATL\_ID – название материала.

Каждая строка PROF создает отдельный файл. Этого может быть больше чем необходимо. Иногда все, что вам нужно узнать, это температура на определенной глубине. Для получения внутренней температуры стены тоже можно воспользоваться только устройством следующим образом:

```
&DEVC XYZ=..., QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.005,  
ID='Temp_1', IOR=3 /
```

Параметр DEPTH (м) показывает расстояние вглубь твердой поверхности. Помните, что эта QUANTITY допустима только как DEVC, а не BNDF. Также не забудьте, что, если толщина стенки уменьшается со временем из-за реакций в твердой фазе, расстояние измеряется от текущей поверхности, и точка измерения «движется» внутрь твердого тела. В конце концов,

точка измерения может выйти за пределы твердого тела, и тогда отображается температура окружающей среды.

### **12.2.5 Динамические плоские слои: группа SLCF**

Параметры группы SLCF («slice file»/ «файл слоя») (таблица 13.20) позволяют записывать различные величины газовой фазы в более чем одной точке. «Слой» является подмножеством всего домена. Он может быть линией, плоскостью или объемом в зависимости от значений XB. XB указывают на границы плоскости «слоя». XB прописывается так же, как и в группах OBST и VENT, где возможно, чтобы 0, 2 или 4 из 6 значений были одинаковыми для указания объема, плоскости или линии соответственно. Удобно задать, например, PBY=5.3 вместо XB, если нужно, чтобы был сохранен слой всей плоскости у=5.3 через домен. PBX и PBZ регулируют плоскости, перпендикулярные осям x и z соответственно.

Динамические векторы можно создать в Smokeview, если заданная строка SLCF имеет атрибут VECTOR=.TRUE. Если два компонента SLCF находятся в одной плоскости, то VECTOR=.TRUE. должен быть только в одной строке. В противном случае будет создан урезанный набор слоев компонентов скорости.

Информация файла слоя записывается в файлы (см. раздел 22.7), помеченные CHID\_n.sf, где n индекс файла слоя. Небольшая программа Фортран fds2ascii.f делает текстовый файл с данными линии, плоскости или объема. См. также раздел 12.4.

### **12.2.6 Динамические граничные величины: группа BNDF**

Параметры группы BNDF («boundary file» / «граничный файл») позволяет записать поверхностные величины всех твердых препятствий. Как и в случае с SLCF, каждая величина прописывается отдельной строкой BNDF, а выходные файлы имеют вид CHID\_n.bf. Не нужно указывать никаких физических величин, кроме QUANTITY. См. таблицу 12.1. Для определенных выходных величин нужно указать дополнительные параметры с помощью группы PROP. В подобных случаях впишите символьную строку PROP\_ID в строку BNDF, чтобы показать FDS, где искать необходимую информацию.

Примите во внимание, что файлы BNDF (раздел 22.9) могут стать очень большими, поэтому будьте осторожны, прописывая временной интервал. Один из способов уменьшить размер выходного файла – отключить прорисовку информации о границах на необходимых препятствиях. В любой заданной строке OBST, если вписана строка BNDF\_OBST=.FALSE., препятствие не выделяется цветом. Чтобы отключить все графическое обозначение границ, задайте BNDF\_DEFAULT=.FALSE. в строке MISC. Потом его можно включить обратно для отдельных препятствий с помощью BNDF\_OBST=.TRUE. в соответствующей строке OBST. Отдельные грани заданного препятствия могут управляться BNDF\_FACE (IOR), где IOR – индекс направления (+1 для положительного направления x, -1 для отрицательного и т.д.).

### **12.2.7 Динамические изоповерхности: группа ISOF**

Группа ISOF («ISOsurfaceFile» / «файл изоповерхности») служит для задания выходных скалярных величин газовой фазы как динамических объемных контуров. Например, изоповерхность с температурой 300°C показывает, где температура газа равна 300°C. Через следующую строку можно сохранить три различных значения температуры:

```
&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE(1)=50., VALUE(2)=200., VALUE(3)=500. /
```

где значения даются в градусах Цельсия. Имейте в виду, что выходные файлы изоповерхности **CHID\_n.iso** могут стать очень большими, так что экспериментируйте с различными частотами выборки (DT\_ISO в строке DUMP).

Любую величину газовой фазы можно сделать динамической с помощью изоповерхности, но будьте осторожны. Чтобы изобразить изоповерхность, желаемая величина должна быть просчитана в каждой ячейке на каждом выходном временном шаге. Для таких величин, как TEMPERATURE, это не проблема, так как FDS вычисляет ее и сохраняет в любом случае. Но плотность сажи или кислород требуют большого периода времени для расчета в каждой ячейке.

### 12.2.8 Выход статических данных Plot3D

По умолчанию данные поля течения в формате Plot3D выводятся 5 раз за расчет. Пять величин выписываются в файл в один момент. По умолчанию указано следующее:

```
&DUMP      ..., PLOT3D_QUANTITY(1:5)='TEMPERATURE',  
'U-VELOCITY','V-VELOCITY','W-VELOCITY','HRRPUV' /
```

Лучше всего оставить компоненты скорости как есть, потому что с их помощью Smokeview изображает векторы скорости. Первую и пятую величины можно изменить параметрами PLOT3D\_QUANTITY (1) и PLOT3D\_QUANTITY (5) в строке DUMP.

Помните, что строка DUMP может быть только одна.

Данные, сохраненные в файлах Plot3D [7] (см. раздел 22.8), используют формат, разработанный NASA и используемый многими программами CFD для отображения результатов расчетов. Данные Plot3D визуализируются тремя способами: как двухмерные контуры, векторные диаграммы и изоповерхности. Векторные диаграммы можно будет увидеть, если один из скоростных компонентов u, v и w или более сохранены в файле Plot3D. Длина вектора и его направление показывают направление и относительную скорость потока жидкости. Цвета вектора показывают скалярную величину, например, температуру. Данные Plot3D сохраняются в файлы с расширением .q. Есть дополнительный файл с координатной информацией, который может выводиться, если для представления файлов предполагается использовать другой пакет программ. Если в строку DUMP вы впишете WRITE\_XYZ=.TRUE., создается файл с расширением .xyz. Smokeview не требует этот файл, потому что координатную информацию получает другим способом.

### 12.2.9 SMOKE3D: реалистичный дым и огонь

Когда вы выполняете расчет огня с использованием расчета горения доли в смеси по умолчанию, FDS автоматически создает два выходных файла, которые изображаются Smokeview как натуралистичный дым и огонь. По умолчанию выходные величины 'soot mass fraction' и 'HRRPUV' (Heat Release Rate Per Unit Volume) используются в визуализации. У вас есть выбор - изобразить массовую долю любого другого вещества вместо 'soot mass fraction', пока MASS\_EXTINCTION\_COEFFICIENT (строка REAC) пригоден для описания ослабления видимого света указанными видами газа. Альтернативные виды газа заданы SMOKE3D\_QUANTITY в строке DUMP. См. в «Руководстве пользователя Smokeview» информацию о том, как эти величины отображаются.

## 12.3 Специальные выходные величины

### 12.3.1 Скорость выделения тепла

Величины, связанные с общим топливно-энергетическим балансом, представляются в файле с разделителями-запятыми **CHID\_hrr.csv**. Этот файл создается автоматически; единственным входным параметром, связанным с ним, является DT\_HRR в строке DUMP. В файле 6 колонок. В первой колонке указано время в секундах. В колонках со второй по пятую интегрированные приращения и потери энергии, все в кВт. Вторая колонка содержит полную скорость выделения тепла, третья - лучистые теплотери на всех границах (твердых и открытых), четвертая - конвективные и лучистые теплотери на границах (т.е. энергия, вытекающая или втекающая в домен), а пятая показывает энергию, проведенную внутрь твердых поверхностей. В шестой содержится полная скорость горения топлива в кг/с. Она включена только для проверки общей скорости выделения тепла.

Пусть  $\Omega$  обозначает открытый вычислительный домен, т.е. объем внутри ограничивающего прямоугольника, заполненного газом. Пусть  $\partial\Omega$  обозначает границу  $\Omega$ . Границу можно разделить на две части  $\partial\Omega = \partial\Omega_1 + \partial\Omega_2$ . Первая часть  $\partial\Omega_1$  представляет собой все твердые стены. Вторая часть  $\partial\Omega_2$  - это отверстия, ведущие наружу домена, через которые могут протекать газы. Это может быть открытое окно наружу или канал принудительной вентиляции.

Общая скорость выделения тепла задается по формуле:

$$Q = \int_{\Omega} q^m dV \quad (12.5)$$

Лучистые потери на границах можно вычислить с помощью интеграла по объему, либо по поверхности:

$$Q = \int_{\Omega} \nabla \cdot q_r dV = \int_{\partial\Omega} q_r \cdot dS = \int_{\partial\Omega} q_r^n dA \quad (12.6)$$

Он описывает энергию, излучаемую огнем и горячими газами, взаимодействующими с твердыми границами или выходящими из вычислительного домена. Конвективная/лучистая потеря на открытых границах имеет вид:

$$Q_{conv} = \int_{\partial\Omega} c_p p (T - T_{\infty}) u \cdot dS + \int_{\partial\Omega_2} q_r^n dA \quad (12.7)$$

где интеграл положительный, если течение и лучистый поток выходят из домена. Проводящие потери на твердых поверхностях описываются формулой:

$$Q_{cond} = \int_{\partial\Omega_1} q_r^n + q_c^n dA \quad (12.8)$$

где интеграл положительный, если тепло теряется в стене, которая холоднее газа.

В сценариях, где огонь является основным источником энергии, после того, как температура газа внутри вычислительного домена достигает относительно стабильного состояния, действительно следующее:

$$Q \approx Q_{conv} + Q_{cond} \quad (12.9)$$

Это только проверка всеобщего баланса энергии, т.е. энергия, вырабатываемая в пространстве, нагревает газы и твердые поверхности, а затем достигается баланс между отдачей и приемом тепла.

### 12.3.2 Видимость и затемнение

Если вы выполняете расчет пожара методом доли в смеси, дым отслеживается вместе со всеми другими основными продуктами горения. Самая необходимая величина для оценки видимости в пространстве – это коэффициент ослабления света  $K$  [8]. Интенсивность монохроматического света, преодолевающего расстояние  $L$  сквозь дым, снижается согласно выражению:

$$I / I_0 = e^{-KL} \quad (12.10)$$

Коэффициент ослабления света  $K$  - это произведение плотности макрочастицы дыма,  $\rho Y_s$ , и удельного массового коэффициента затухания, который зависит от топлива:

$$K = K_m \rho Y_s \quad (12.11)$$

Устройства, выводящие % затемнения, такие как DEVC с QUANTITY (величиной всасывания, частичного затемнения aspiration, spot obscuration (датчик дыма) или path obscuration (затемнения траектории) (приемник луча) описываются в разделах 11.3.6, 11.3.4 и 11.3.5.

Оценку видимости в дыму можно сделать с помощью уравнения:

$$S = C/K \quad (12.12)$$

где  $C$  – безразмерная постоянная характеристика типа объекта, рассматриваемого в дыму, т.е.  $C=8$  для объекта, излучающего свет, и  $C=3$  для светоотражающего объекта [8]. Так как  $K$  изменяется от точки к точке в домене, так же изменяется и видимость  $S$ . Помните, что FDS может отследить дым, только если указаны скорость его образования и состав. Прогнозирование этих величин недоступно для текущей версии расчета.

Три параметра контролируют образование дыма и видимость; каждый параметр – это входные данные в строке REAC. Первый параметр SOOT\_YIELD, который является долей массы топлива, которое превращается в сажу. Второй параметр называется MASS\_EXTINCTION\_COEFFICIENT, это  $K_m$  в уравнении 12.11. По умолчанию значение равно  $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ , это значение для пламенного горения дерева и пластика. Третий параметр - VISIBILITY\_FACTOR, постоянная  $C$  в уравнении 12.12. По умолчанию равен 3.

Выходная величина, связанная с «extinction coefficient» (коэффициентом ослабления света), обозначается как  $K$ . Видимость  $S$  выводится ключевым словом «visibility». Помните, что каждая из них привязана к модели доли в смеси.

### 12.3.3 Высота слоя и средняя температура верхнего и нижнего слоя

Инженерам по пожарной безопасности часто нужно узнать нахождение границы между горячим, наполненным дымом верхним слоем и холодным нижним слоем в горящем пожарном отсеке. Относительно простые двухзонные модели рассчитывают эту величину напрямую, вместе со средней температурой верхнего и нижнего слоев. В модели вычислительной динамики течения (computational fluid dynamics/CFD), такой, как FDS, нет



двух разных зон, есть непрерывный профиль температуры. Тем не менее, существуют методы для определения высоты слоя и средних температур из непрерывного вертикального профиля температуры. Один из таких методов [10] заключается в следующем: Возьмите непрерывную функцию  $T(z)$ , определяющую температуру  $T$  как функцию высоты над полом  $z$ , где  $z=0$  является полом,  $z=H$  – потолком. Опишите  $T_u$  как температуру верхнего слоя,  $T_l$  как температуру нижнего слоя, а  $z_{int}$  как высоту границы. Вычислим величины:

$$(H - z_{int})T_u + z_{int} = \int_0^H T(z)dz = I_1$$

$$(H - z_{int})\frac{1}{T_u} + z_{int}\frac{1}{T_l} = \int_0^H \frac{1}{T(z)}dz = I_2$$

Найдем  $z_{int}$ :

$$z_{int} = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H} \quad (12.13)$$

Пусть  $T_l$  будет температурой в самой нижней ячейке, и по правилу Симпсона выполним численное интегрирование /1 и /2.  $T_u$  определяется как средняя температура верхнего слоя по уравнению:

$$(H - z_{int})T_u = \int_{z_{int}}^H T(z)dz \quad (12.14)$$

Дальнейшее описание подобных операций можно найти в [11].

Величины LAYER HEIGHT, UPPER TEMPERATURE и LOWER TEMPERATURE можно обозначить с помощью строки «устройства» (DEVC) во входном файле<sup>1</sup>. Например, запись

&DEVC XB=2.0,2.0,3.0,3.0,0.0,3.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='whatever' /

создает временную зависимость высоты слоя дыма в  $x=2$  и  $y=3$  между  $z=0$  и  $z=3$ . Если применяются составные сетки, вертикальная траектория *не должна* пересекать границы сетки.

#### 12.3.4 Сравнение действительной температуры газа с измеренной

Выходная величина THERMOCOUPLE – это температура самой термопары, обычно близкая к температуре газа, но не всегда. Она определяется следующим уравнением для  $T_{TC}$  [12]:

$$\varepsilon_{TC}(\sigma T_{TC}^4 - U/4) + h(T_{TC} - T_g) = 0 \quad (12.5)$$

где  $\varepsilon_{TC}$  - коэффициент излучения термопары,  $U$  – суммарная интенсивность излучения,  $T_g$  – действительная температура газа, а  $h$  – коэффициент передачи тепла небольшой сфере,  $h=k_a Nu/Pr/d_{TC}$ . BEAD\_DIAMETER и BEAD\_EMISSIVITY задаются в соответствующей строке PROP. См. описание передачи тепла капле воды в «Техническом руководстве по применению FDS» на предмет подробностей конвективной передачи тепла небольшой сфере.

<sup>1</sup> Помните, что ни в FDS 5, ни где-либо еще этих величин больше нет в виде файлов слоев.

### 12.3.5 Тепловой поток и тепловое излучение

Существует несколько способов регистрации теплового потока на твердой поверхности. Если нужно зарегистрировать результирующий тепловой поток на поверхности,  $\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''$ , воспользуйтесь QUANTITY, называемой HEAT\_FLUX. Отдельными компонентами являются чистые конвективные и лучистые потоки, CONVECTIVE\_FLUX и RADIATIVE\_FLUX соответственно. Если нужно сравнить предполагаемый тепловой поток с измеренным, для этого часто нужен GAUGE\_HEAT\_FLUX. Разница между HEAT\_FLUX и GAUGE\_HEAT\_FLUX заключается в том, что первая представляет собой скорость, с которой энергия поглощается твердой поверхностью; а последняя - это энергия, которая поглотилась бы, если бы поверхность была холодная (или какой-либо заданной температуры)

$$\dot{q}_r'' / \varepsilon + \dot{q}_c'' + h(T_w - T_\infty) + \sigma(T_w^4 - T_\infty^4)$$

Если используемый в эксперименте прибор для измерения теплового потока показал температуру, отличающуюся от температуры окружающей среды, укажите GAUGE\_TEMPERATURE в строке PROP, связанной с устройством. Если будете сравнивать с измерениями радиометра, воспользуйтесь RADIOMETER:

$$\dot{q}_r'' / \varepsilon + \sigma(T_w^4 - T_\infty^4)$$

В диагностических целях иногда удобно вывести INCIDENT\_HEAT\_FLUX:

$$\dot{q}_r'' / \varepsilon + \sigma T_w^4 + \dot{q}_c''$$

Все вышеуказанные выходные величины, относящиеся к тепловому потоку, описываются на твердой поверхности. Но есть выходная величина газовой фазы, называемая RADIANT\_INTENSITY, требуемая в основном для устранения диагностических проблем с решателем излучения. Несмотря на то, что она измеряется в кВт/м<sup>2</sup>, ее не нужно воспринимать как тепловой поток, направленный на объект, который будет расположен в этой определенной точке в пространстве. Наоборот, это суммарные глобальные направления интенсивности излучения,  $I(x,s)$ , которые являются функцией и пространства, и направления ( $s$  – вектор направления с диапазоном  $4\pi$  телесных углов):

$$U(x) = \int I(x,s) ds \quad (12.6)$$

Обратите внимание, что  $U$  в уравнении (12.15), применяемое для поиска эффективного лучистого потока к маленькому пузырьку термодпары, так что его температуру, в отличие от температуры газа, можно вычислить. Если поделить  $U$  на  $4\pi$ , вы получите среднюю интенсивность в определенной точке в пространстве:

$$\bar{I}(x) = \frac{U(x)}{4\pi} \quad (12.7)$$

Падающий тепловой поток благодаря постоянной интенсивности равен  $\pi \bar{I}$ , а средний падающий лучистый тепловой поток, таким образом, равен:

$$\overline{\dot{q}_{r,inc}''} = \pi \bar{I} = \pi \frac{U}{4\pi} = \frac{U}{4} \quad (12.8)$$

Итак, вы можете использовать  $RADIATIVE\_INTENSITY/4$  как приближенное значение для падающего лучистого теплового потока. Но это число не учитывает неравномерную природу излучения. Также помните, что это падающий тепловой поток. Чтобы получить результирующий тепловой поток на объект или человека, температура поверхности которого равна  $T_s$ , вам нужно вычесть  $\varepsilon\sigma T_s^4$ , выходящий тепловой поток.

### 12.3.6 Выходные величины капли

Различные свойства испаряющихся капель можно записать. Некоторые из выходных величин связаны с твердыми границами. Например,  $[PART\_ID]\_MPUA$  – это Mass Per Unit Area (масса на единицу площади) капель, с названием  $PART\_ID$ . Так же  $[PART\_ID]\_AMPUA$  – это Accumulated Mass Per Unit Area (накопленная масса на единицу площади). Обе измеряются в  $кг/м^2$ . Воспринимайте эти выходные данные как степень мгновенной плотности массы на единицу площади и накопившийся результат соответственно. Накопившееся количество соответствует «тесту ковша», когда капли собираются в ковш, и в конце определенного периода определяется общая масса. Охлаждение твердой поверхности каплями данного типа задается  $[PART\_ID]\_CPUA$ , охлаждение на единицу площади (Cooling Per Unit Area) в  $кВт/м^2$ .

Не забывайте о том, что характер изменения по умолчанию для капель, ударяющихся о «пол» (т.е. плоскость  $z=ZMIN$ ) таков, что они исчезают ( $POROUS\_FLOOR=.TRUE.$  в строке  $MISC$ ). В этом случае  $[PART\_ID]\_MPUA$  будет ноль, а  $[PART\_ID]\_AMPUA$  нет. FDS сохраняет массу капли прямо перед ее исчезновением из расчетов с целью экономии времени ЦПУ.

На расстоянии от твердых поверхностей  $[PART\_ID]\_MPUV$  это масса на единицу объема капель, когда они пролетают через воздух, в  $кг/м^3$ .  $[PART\_ID]\_FLUX\_X$ ,  $[PART\_ID]\_FLUX\_Y$  и  $[PART\_ID]\_FLUX\_Z$  образуют *только* слой и файлы Plot3D потока массы капель в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно в  $кг/м^2/с$ .

### 12.3.7 Границы структурных моделей

FDS решает одномерное уравнение теплопроводности для каждой граничной ячейки, отмечая границу между газом и твердым телом, предполагается, что свойства материалов слоя/слоев заданы. Результаты можно передать (либо DEVC, либо BNDF) в другие расчеты, которые прогнозируют механическую реакцию стен или конструкции. Одномерное решение уравнения теплопроводности годится для многих приложений, а для случаев, для которых оно не годится, можно применить другой подход. FDS включает расчет температуры адиабатической поверхности (Adiabatic Surface Temperature - AST) величину, которая является образцом теплового потока к твердой поверхности. Согласно идее, выдвинутой Ульфом Викстромом [13], следующее уравнение можно решить с помощью простого итерационного метода для определения эффективной температуры газа,  $T_{AST}$ :

$$q_r^n + q_c^n = \varepsilon\sigma(T_{AST}^4 - T_w^4) + h(T_{AST} - T_w) \quad (12.9)$$

Сумма  $\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''$  - это результирующий тепловой поток, направленный на твердую поверхность, температура которой равна  $T_w$ . Тепловые потоки и температура поверхности вычисляются в FDS, и они взаимозависимы. Вычисленная температура стены влияет на результирующий тепловой поток и наоборот. Но из-за того, что FDS вычисляет решения одномерного

уравнения теплопроводности в твердом теле, в него легко может закрасться ошибка, если имеет значение поперечная теплопроводность внутри твердого тела. Таким образом, в некоторых сценариях ни прогнозируемые тепловые потоки, ни температура поверхности не могут служить точным индикатором степени воздействия горячих дымовых газов на твердые объекты.

Конечно, и тепловые потоки,  $\dot{q}_r''$  и  $\dot{q}_c''$ , и температуру поверхности,  $T_w$  можно передать из FDS в другой расчет, также можно сделать необходимые поправки на основе предположительно более точных прогнозов температуры твердого тела. Также можно передать отдельную величину  $T_{AST}$ , так как это температура, которую твердая поверхность эффективно «распознает». Она представляет термальную среду газовой фазы, какой бы сложной она ни была, но она не вносит неопределенности, связанной с простым расчетом теплопроводности твердой фазы в FDS. Очевидно, что целью передачи информации в более подробный расчет является получение более точного прогноза температуры твердого тела (и в конечном счете его механическую реакцию), чем может дать FDS.

### 12.3.8 Интегрированная масса и потоки энергии, проходящие через отверстия

Результирующий поток массы или энергии, выходящий или входящий в пожарные отсеки может быть полезен для многих целей. Есть несколько выходных параметров, которые обращаются к ним. Все они прописываются только через группу устройства (DEVC). Например:

```
&DEVC XB=0.3,0.5,2.1,2.5,3.0,3.0, QUANTITY='MASS FLOW', ID='whatever' /
```

Выходы результирующего потока интегрированной массы через заданную плоскую область, направленную в положительном направлении z, как в этом случае. Три потока - 'VOLUME FLOW', 'MASS FLOW' и 'HEAT FLOW' определяются следующим образом:

$$V = \int u \cdot dS$$

$$m = \int \rho u \cdot dS$$

$$q = \int c_p \rho (T - T_\infty) u \cdot dS$$

Знак «+» или «-» в имени QUANTITY задает расчет интеграла потока только в одном направлении - положительном или отрицательном. Другими словами если вы хотите знать поток массы, направленный из пожарного отсека, возьмите 'MASS FLOW +' или 'MASS FLOW -', в зависимости от направления двери.

### 12.3.9 Коэффициенты давления и ветра

В вопросах ветрового воздействия на здание повсеместно используемая величина известна как PRESSURE\_COEFFICIENT:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U^2} \quad (12.20)$$

$p_\infty$  - это давление окружающей среды или «свободного потока», а  $\rho_\infty$  - это плотность окружающей среды. Параметр  $U$  - это скорость свободного потока ветра, задаваемая параметром CHARACTERISTIC\_VELOCITY в строке PROP:

```
&BNDF QUANTITY='PRESSURE_COEFFICIENT', PROP_ID='whatever' /
```

&DEVC ID='pressure tap', XYZ=..., IOR=2, QUANTITY='PRESSURE\_COEFFICIENT',  
 PROP\_ID='whatever' /  
 &PROP ID='whatever', CHARACTERISTIC\_VELOCITY=3.4 /

Таким образом, вы можете как рисовать значения  $C_p$  во всех точках поверхности, так и создать отдельную временную зависимость  $C_p$ , поместив устройство в нужной точке.

## 12.4 Извлечение чисел из выходных файлов данных

Часто бывает нужно представить результаты расчетов в форме, отличающейся от того, что может предложить Smokeview. Для этого случая есть короткая программа **fds2ascii.f90** с ПК-совместимой версией **fds2ascii.exe**. Чтобы запустить программу, просто впишите

```
fds2ascii
```

в командной строке. Вам будут заданы несколько вопросов о том, какой тип выходных файлов обрабатывать, какой временной интервал для выведения среднего значения данных по времени и т.д. Отдельный файл создается под названием CHID\_ **fds2ascii.exe**.

## 12.5 Сводка выходных величин

Таблица 12.1, представленная на следующих страницах, подводит итог разным выходным величинам. Обратите внимание, что величины с малым регистром свойственны только вычислениям, в которых участвует доля в смеси Z. Если отдельные вещества перечислены в строке SPEC, величины массовой и объемной долей определяются [SPEC\_ID] и [SPEC\_ID]\_VF соответственно. Например, величины water vapor и WATER VAPOR обозначают объемную долю водяного пара, образованного при сгорании, и массовую долю водяного пара от испарившихся капель спринклера соответственно.

Колонка “FileType” («Тип файла») содержит допустимые выходные файлы. «B» обозначает «Boundary» («Граница», BNDF), «D» - «Device» («Устройство», DEVC), «I» - «Isosurface» («Изоповерхность», ISOF), «P» - Plot3D, “PA” – «Particle» («Частица», PART), «S» - «Slice» («Слой», SLCF). Будьте осторожны, указывая сложные величины для файлов изоповерхности или Plot3D, так как для этого требуются вычисления в каждой ячейке газовой фазы.

Таблица 12.1: Сводка всех выходных величин

Выходная QUANTITY	Символ	Ед. измерения	Тип файла
ABSORPTION_COEFFICIENT	$\kappa$	1/м	D,I,P,S
ADIABATIC_SURFACE_TEMPERATURE	См. раздел 12.3.7	°C	B,D
aspiration (аспирация)	См. раздел 11.3.6	%	D
BURNING_RATE	$\dot{m}_f''$	кг/(м <sup>2</sup> с)	B,D
carbon dioxide (Углекислый газ)	$XCO_2(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
carbon monoxide (Окись углерода)	$XCO(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
CONTROL	См. раздел 11.5		D
CONVECTIVE_FLUX	$\dot{q}_c''$ (Раздел 12.3.5)	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
DENSITY	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	D,I,P,S
DIVERGENCE	$\nabla \cdot \mathbf{u}$	с <sup>-1</sup>	D,I,P,S
DROPLET_DIAMETER	$2r_d$	мк	PA

DROPLET VELOCITY	$ ud $	м/с	PA
DROPLET TEMPERATURE	$Td$	°C	PA
DROPLET MASS	$md$	кг	PA
DROPLET AGE	$td$	с	PA
extinction coefficient (Коэффициент экстинкции)	$K$ (Раздел 12.3.2)	1/м	D,I,P,S
fuel (топливо)	$X_F(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
GAUGE HEAT FLUX	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
H	$H= u ^2/2+\tilde{p}/\rho_0$	(м/с) <sup>2</sup>	D,I,P,S
HEAT FLOW	См. раздел 12.3.8	кВт	D
HEAT FLUX	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
HRR	$\int \dot{q}''' dV$	кВт	D
HRRPUV	$\dot{q}'''$	кВт/м <sup>3</sup>	D,I,P,S
INCIDENT HEAT FLUX	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
INSIDE_WALL_TEMPERATURE	См. раздел 12.2.4	°C	D
LAYER HEIGHT	См. раздел 12.3.3	м	D
LINK TEMPERATURE	См. раздел 11.3.3	°C	D
LOWER TEMPERATURE	См. раздел 12.3.3	°C	D
MASS FLOW	См. раздел 12.3.8	Кг/с	D
MIXTURE FRACTION	$Z$	кг/кг	D,I,P,S
nitrogen (азот)	$X_{N2}(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
optical depth (оптическая глубина)	$OD = K/2.3$ (Section 12.3.2)	1/м	D,I,P,S
oxygen (кислород)	$X_{O2}(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
oxygen mass fraction (массовая фракция кислорода)	$Y_{O2}(Z)$	кг/кг	D,I,P,S
[PART ID] AMPUA	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>2</sup>	B,D
[PART ID] CPUA	См. раздел 12.3.6	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
[PART ID] FLUX X	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>2</sup> /с	P,S
[PART ID] FLUX Y	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>2</sup> /с	P,S
[PART ID] FLUX Z	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>2</sup> /с	P,S
[PART ID] MPUA	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>2</sup>	B,D
[PART ID] MPUV	См. раздел 12.3.6	кг/м <sup>3</sup>	D,I,P,S
Path obstruction (затенение траектории)	См. раздел 11.3.5	%	D
PRESSURE	$\tilde{p}$	Па	D,I,P,S
PRESSURE COEFFICIENT	$C_p$ (Раздел 12.3.9)		B,D
RADIANT INTENSITY	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	D,I,P,S
RADIATIVE FLUX	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
RADIOMETER	См. раздел 12.3.5	кВт/м <sup>2</sup>	B,D
RELATIVE HUMIDITY	Относительная влажность	%	D,I,P,S
soot volume fraction (фракция объема сажи)	$\rho Y_s(Z)/\rho_s$	моль/моль	D,I,P,S
soot density (плотность сажи)	$\rho Y_s(Z)$	мг/м <sup>3</sup>	D,I,P,S
[SPEC ID]	$Y$	кг/кг	D,I,P,S
[SPEC ID] VF	$X$	моль/моль	D,I,P,S
[SPEC ID] FLUX X	$\rho u Y_a$	кг/м <sup>2</sup> /с	D,I,P,S
[SPEC ID] FLUX Y	$\rho v Y_a$	кг/м <sup>2</sup> /с	D,I,P,S
[SPEC ID] FLUX Z	$\rho w Y_a$	кг/м <sup>2</sup> /с	D,I,P,S

spot obscuration (затемнение сажи)	См. раздел 11.3.4	%/м	D
SPRINKLER LINK TEMPERATURE	См. раздел 11.3.1	°C	D
TEMPERATURE	$T$ (Раздел 12.3.4)	°C	D,I,P,S
THERMOCOUPLE	$T_{TC}$ (Раздел 12.3.4)	°C	D,I,P,S
TIME	$t$ (Раздел 11.1)	с	D
U-VELOCITY	$u$	м/с	D,I,P,S
V-VELOCITY	$v$	м/с	D,I,P,S
W-VELOCITY	$w$	м/с	D,I,P,S
UPPER TEMPERATURE	См. раздел 12.3.3	°C	D
VELOCITY	$\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$	м/с	D,I,P,S
VISCOSITY	$\mu$	кг/м/с	D,I,P,S
visibility (видимость)	$S=C/K$ (Раздел 12.3.2)	м	D,I,P,S
VOLUME FLOW	См. раздел 12.3.8	М <sup>3</sup> /с	D
WALL TEMPERATURE	$T_w$	°C	B,D
water vapor (водяной пар)	$X_{H_2O}(Z)$	моль/моль	D,I,P,S
WATER VAPOR	$X_{H_2O}$	моль/моль	D,I,P,S

## Глава 13

### Список входных параметров в алфавитном порядке

В данном разделе перечислены все входные параметры для Программы FDS. Параметры даны в отдельных таблицах и сгруппированы по списку имен. Таблицы и параметры расположены в алфавитном порядке. Данное приложение является кратким справочником параметров, а подробное описание дано в основной части Руководства. Перекрестная ссылка на важные разделы и таблицы параметров данного раздела дана в таблице 5.1 (Раздел 5). Причиной такого упорядочивания является то, что большинство перечисленных параметров являются взаимоисключающими и если задать более одного параметра, то программа либо даст сбой, либо ее функционирование будет сложно прогнозировать. Кроме того, при задании некоторых параметров запускается работа кода программы в определенном режиме. Например, если задать теплопроводность твердой поверхности, то программа определит материал как термически-плотный и потребует указания других свойств. Не рекомендуется без необходимости задавать все подряд свойства из руководства. Прописывать нужно лишь те параметры, которые необходимы для описания нужного сценария.

#### 13.1 BNDF (Параметры граничного файла)

Таблица 13.1: более подробно см. раздел 12.2.6.

BNDF (Параметры граничного файла)				
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
PROP_ID	Character	Source of specific property info Источник специфических свойств данных		
QUANTITY	Character	Quantity to visualize Величина для визуализации		

#### 13.2 CLIP (Минимальные/максимальные ограничивающие параметры)

Таблица 13.2: более подробно см. раздел 6.6

CLIP (Заданные верхние и нижние ограничения)				
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
MAXIMUM_DENSITY	Real	Maximum Gas Density Максимальная плотность газа	кг/м <sup>3</sup>	
MAXIMUM_MASS_FRACTION	Real Array	Maximum Gas Mass Fraction Максимальная массовая доля газа	кг/кг	
MAXIMUM_TEMPERATURE	Real	Maximum Gas Temperature Максимальная температура газа	°C	
MINIMUM_DENSITY	Real	Minimum Gas Density Минимальная плотность газа	кг/м <sup>3</sup>	
MINIMUM_MASS_FRACTION	Real Array	Minimum Gas Mass Fraction Минимальная массовая доля газа	кг/кг	
MINIMUM_TEMPERATURE	Real	Minimum Gas Temperature Минимальная температура газа	°C	



### 13.3 CTRL (Параметры функции управления)

Таблица 13.3: более подробно см. раздел 11.5.

CTRL (Параметры функции управления)				
DELAY	Real	Time delay Временная задержка	с	0.
FUNCTION_TYPE	Character	Type of control function Тип функции управления		
ID	Character	IDentifier Идентификатор (ID)		
INITIAL_STATE	Logical	Initial state of control function Исходное значение функции управления		.FALSE.
INPUT_ID	Char. Array	DEVC and/or CTRL input IDs DEVC и/или CTRL входные ID		
LATCH	Logical	Control function changes state only once Функция управления изменяет свое состояние только один раз		.TRUE.
N	Integer	Number of .TRUE. INPUTs Количество .TRUE. INPUTов		1
ON_BOUND	Character	Active edge of a DEADBAND Активный край DEADBAND (мертвой зоны)		LOWER НИЖНИЙ
RAMP_ID	Character	ID for a CUSTOM ramp controller ID для линейного оператора CUSTOM		
SETPOINT(2)	Real	Lower and upper bound of a DEADBAND Нижняя и верхняя границы DEADBAND (мертвой зоны)		

### 13.4 DEVC (Параметры устройства)

Таблица 13.4: более подробно см. раздел 11.1.

DEVC (Параметры устройства)				
BYPASS_FLOWRATE	Real	Aspiration smoke detector parameter Параметр аспирационного датчика дыма	кг/с	0
CTRL_ID	Character	Associated CTRL line Ассоциативная строка CTRL		
DELAY	Real	Transport time for an aspiration detector Время переноса для аспирационного датчика	с	0
DEVC_ID	Character	Associated DEVC line for aspiration detector Ассоциативная строка DEVC для аспирационного датчика		
DEPTH	Real	Depth into surface for internal wall temp Глубина внутрь поверхности для температуры внутренней стены	м	0
FLOWRATE	Real	Suction flowrate for an aspiration detector	кг/с	0

		Скорость потока всасывания для аспирационного датчика		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
IOR	Integer	Index of Orientation ( $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ ) Индекс Направления ( $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ )		
ID	Character	Identifying label for output Идентификационная метка для выходных данных		
INITIAL_STATE	Logical	Initial state of device Исходное состояние устройства		.FALSE.
LATCH	Logical	Device cannot change state multiple times Устройство не может многократно менять состояние		.TRUE.
ORIENTATION	Real Triplet	Direction vector Вектор направления		0,0,-1
PROP_ID	Character	Associated PROPerTy line Ассоциированная строка Свойства		
QUANTITY	Character	Name of Quantity to output Наименование Величины для выходных данных		
ROTATION	Real Triplet	Rotation Angle Угол поворота	град ус	0
SETPOINT	Real	Value at which device changes state Значение, при котором устройство изменяет свое состояние		
STATISTICS	Character	См. Раздел 12.2.3		
SURF_ID	Character	См. Раздел 12.2.3		
TRIP_DIRECTION	Integer	Sign of derivative at first state change Знак производной при первом изменении состояния		1
XB(6)	Real Sextuplet	Coordinates of non-point measurement Координаты протяженных измерительных устройств	м	
XYZ	Real Triplet	Physical coordinates Физические координаты	м	

### 13.5 DUMP (Параметры выходных данных)

Таблица 13.5: более подробно см. раздел 12.1

DUMP (Параметры выходных данных)				
COLUMN_DUMP_LIMIT	Logical	Limit text output to 255 columns Ограничение текста выходных данных - 255 колонок		.TRUE.
DT_BNDF	Real	Boundary dump interval Интервал дампа границ	с	$2\Delta t/NFRAMES$
DT_CTRL	Real	Control status dump interval Интервал дампа состояния	с	$\Delta t/NFRAMES$

		контроля		
DT_DEVC	Real	Device output dump interval Интервал дампа выходных данных устройства	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_HRR	Real	Heat release dump interval Интервал дампа теплоотдачи	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_ISOFC	Real	Iso-surface dump interval Интервал дампа изоповерхности	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_MASS	Real	Mass diagnostic dump interval Интервал дампа диагностики массы	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_PART	Real	Particle dump interval Интервал дампа частиц	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_PL3D	Real	PLOT3D dump interval Интервал дампа PLOT3D	c	$\Delta t/5$
DT_PROF	Real	Profile dump interval Интервал дампа профиля	c	$\Delta t/NFRAMES$
DT_RESTART	Real	Restart core dump interval Интервал дампа перезапуска	c	1000000.
DT_SLCF	Real	Slice dump interval Интервал дампа слоя	c	$\Delta t/NFRAMES$
FLUSH_FILE_BUFFERS	Logical	Periodically empty file buffers Периодический сброс буферов файлов		.TRUE.
MASS_FILE	Logical	Flag for species MASS file Индикатор наличия файла видов вещества MASS		.FALSE.
MAXIMUM_DROPLETS	Integer	Max particles per mesh Максимальное число частиц на сетке		500000
NFRAMES	Integer	Number of Frames of output data Количество кадров выходных данных		1000
PLOT3D_QUANTITY(5)	Char. Quint	Names of PLOT3D Quantities Наименования Величин PLOT3D		См. Раздел 12.2.8
SMOKE3D	Logical	Flag for 3D Smoke Visualization Индикатор состояния для визуализации трехмерного дыма		.TRUE.
SMOKE3D_QUANTITY	Character.	См. Главу 12.2.9		
WRITE_XYZ	Logical	Flag for writing PLOT3D .xyz file Индикатор состояния для записи файла координат xyz PLOT3D		.FALSE.

$$\Delta t = T\_END - T\_BEGIN$$

### 13.6 HEAD (Параметры заголовка)

Таблица 13.6: более подробно см. раздел 6.1

HEAD (Параметры Заголовка)			
CHID	Character	Job Identification String Строка идентификации работы	'output' «ВЫХОДНЫЕ»

				данные»
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
TITLE	Character	Title for job Наименование работы		

### 13.7 HOLE (Параметры отверстия)

Таблица 13.7: более подробно см. раздел 7.2

HOLE (Параметры отверстия)				
COLOR	Character	Color name of obstruction color Цвет отверстия		
CTRL_ID	Character	ID of ConTRoL to control hole's existence (Идентификатор элемента управления) CTRL_ID для управления наличием отверстия		
DEVC_ID	Character	ID of DEViCe to control hole's existence ID DEViCe (устройства) для управления наличием отверстия		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
RGB(3)	Integer Triplet	Color indices (0 -255) for resulting obstruction(s) Цветовые показатели (0-255) для результирующего отверстия(й)		
TRANSPARENCY	Real	Transparency of obstruction Прозрачность отверстия		
XB(6)	Real Sextuplet	Physical coordinates Физические координаты	м	

### 13.8 INIT (Начальные условия)

Таблица 13.8: более подробно см. раздел 6.5

INIT (Начальные условия)				
DENSITY	Real	Initial value of density Исходное значение плотности	кг/м <sup>3</sup>	Ambient
MASS_FRACTION(II)	Real Array	Initial value of species II Исходное значение видов веществ II	кг/кг	Ambient
TEMPERATURE	Real	Initial value of temperature Исходное значение температуры	°C	TMPA
XB(6)	Real Sextuplet	Coordinates Координаты	м	

### 13.9 ISOF (Параметры изоповерхности)

Таблица 13.9: более подробно см. раздел 12.2.7

ISOF (Параметры изоповерхности)				
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
QUANTITY	Character	Quantity to visualize Величина для визуализации		

VALUE(I)	Real Array	Contour value(s) Значение(я) контура		
----------	------------	---	--	--

### 13.10 MATL (Свойства материала)

Таблица 13.10: более подробно см. раздел 8.4

MATL (Свойства материала)				
A	Real	Pre-exponential factor Предэкспоненциальный множитель	1/с	1E13
ABSORPTION_COEFFICIENT	Real	Absorption Coefficient Коэффициент поглощения	1/м	50000.
BOILING_TEMPERATURE	Real	Boiling temperature Температура кипения	°C	5000.
CONDUCTIVITY	Real	Thermal conductivity Удельная теплопроводность	Вт/м*К	0.1
CONDUCTIVITY_RAMP	Character	Ramp ID for conductivity Ramp ID теплопроводности		
DENSITY	Real	Solid mass per unit volume Плотность (Масса твердого тела на единицу объема)	кг/м <sup>3</sup>	500.
E	Real	Activation energy Энергия активации	кг/кмоль	
EMISSIVITY	Real	Emissivity Коэффициент излучения		0.9
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
HEAT_OF_COMBUSTION	Real	Heat of combustion Теплота сгорания	кДж/кг	
HEAT_OF_REACTION	Real	Heat of reaction Теплота реакции	кДж/кг	0.
ID	Character	IDentifier Идентификатор		
THRESHOLD_TEMPERATURE	Real	Threshold temperature Пороговая температура	°C	-273.15
N_REACTIONS	Character	Number of Reactions Количество реакций		0
N_S	Real	Exponent of mass fraction Показатель массовой доли		1.
N_T	Real	Exponent of temperature Показатель температуры		0.
NU_FUEL	Real	Fuel Yield Выход топлива	кг/кг	0.
NU_RESIDUE	Real	Residue Yield Выход остатка	кг/кг	0.
NU_WATER	Real	Steam Yield Выход паров	кг/кг	0.
REFERENCE_RATE	Real	Reaction rate at ref. temp. Скорость реакции при	с <sup>-1</sup>	0.10

		исходной температуре		
REFERENCE_TEMPERATURE	Real	Reference temperature Исходная температура	°C	
RESIDUE	Character	ID of residue MATL ID остатка MATL		
SPECIFIC_HEAT	Real	Specific heat Удельная теплоемкость	Дж/кг/К	1.0
SPECIFIC_HEAT_RAMP	Character	Ramp ID for specific heat Ramp ID удельной теплоемкости		

### 13.11 MESH (Параметры сетки)

Table 13.11: более подробно см. раздел 6.3.

MESH (Параметры сетки)				
COLOR	Character	Mesh Line Color Цвет линии сетки		'BLACK'
CYLINDRICAL	Logical	2-D Axi-symmetric calculation Двухмерный осесимметричный расчет		.FALSE.
ID	Character	MESH IDentifier Идентификатор сетки		
IJK	Integer Triplet	No. cells in x, y, and z directions Количество ячеек в координатах x, y, z		10
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
RGB	Integer Triplet	Color indices (0-255) Цветовые показатели (0-255)		0,0,0
SYNCHRONIZE	Logical	Sync. time steps of multiple meshes Синхронизация временных шагов составных сеток		.TRUE.
XB	Real Sextuplet	Min/Max Coordinates of the MESH Мин./Макс. Координаты сетки	м	0,1,0,1,0,1

### 13.12 MISC (Вспомогательные параметры)

Table 13.12: более подробно см. раздел 6.4.

MISC (Вспомогательные параметры)				
ASSUMED_GAS_TEMPERATURE	Real	См. Раздел 8.1		
BACKGROUND_SPECIES	Character	См. Раздел 9.2		'AIR'
BAROCLINIC	Logical	Baroclinic torque correction Коррекция бароклинического момента силы		.FALSE.
BNDF_DEFAULT	Logical	См. Раздел 12.2.6		.TRUE.
CFL_MAX	Real	См. Раздел 6.4.6		1.0
CFL_MIN	Real	См. Раздел 6.4.6		0.8
CSMAG	Real	Smagorinsky constant Константа Смагоринского		0.20
CONDUCTIVITY	Real	См. Раздел 9.2	Вт/м*К	
CO_PRODUCTION	Logical	См. Раздел 9.1.1		.FALSE.

DNS	Logical	Direct Numerical Simulation Прямое численное моделирование		.FALSE.
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
GROUND_LEVEL	Real	См. Раздел 8.2.5		
GVEC	Real triplet	Gravity vector Вектор силы тяжести	м/с <sup>2</sup>	0,0,-9.81
H_FIXED	Real	См. Раздел 18.1		
HUMIDITY	Real	Relative Humidity Относительная влажность	%	40.
ISOTHERMAL	Logical	Isothermal calculation Изотермический расчет		.FALSE.
LAPSE_RATE	Real	См. Раздел 8.2.5	°C/м	0
LES	Logical	Large Eddy Simulation Масштабное вихревое моделирование		.TRUE.
MW	Real	Molecular Weight (Section 9.2) Молекулярная масса (Раздел 9.2)	г/моль	
NOISE	Logical	Toggle initial noise on and off Включение и выключение исходных помех		.TRUE.
PR	Real	Prandtl number (LES only) Число Прандтля (только для LES)		0.5
P_INF	Real	Ambient pressure Давление окружающей среды	Па	101325
POROUS_FLOOR	Logical	См. Раздел 11.3.1		.TRUE.
RADIATION	Logical	Radiation calculation flag Индикатор состояния расчета излучения		.TRUE.
RAMP_GX	Character	Time function, x comp. of gravity Временная зависимость компоненты x силы тяжести		
RAMP_GY	Character	Time function, y comp. of gravity Временная зависимость компоненты y силы тяжести		
RAMP_GZ	Character	Time function, z comp. of gravity Временная зависимость		

		компоненты тяжести	z силы	
RESTART	Logical	Restart previous calculation Перезапуск предыдущего расчета		.FALSE.
RESTART_CHID	Character	Restart file CHID Перезапуск файла CHID		CHID
SC	Real	Schmidt number (LES only) Число Шмидта (только для LES)		0.5
SOLID PHASE ONLY	Logical	См. Раздел 8.1		.FALSE.
STRATIFICATION	Logical	См. Раздел 8.2.5		.TRUE.
SUPPRESSION	Logical	См. Раздел 9.1.1		.TRUE.
SURF_DEFAULT	Character	Default SURFace type Тип поверхности по умолчанию		'INERT'
TEXTURE_ORIGIN(3)	Char. Triplet	См. Раздел 8.6.1		(0.,0.,0.)
THICKEN OBSTRUCTIONS	Logical	См. Раздел 7.1		.FALSE.
TMPA	Real	Ambient Temperature Температура окружающей среды	°C	20.
U0,V0,W0	Reals	Prevailing velocity field Преобладающее поле скоростей	м/с	0.
VISCOSITY	Real	См. Раздел 9.2	кг/м/с	
VN MAX	Real	См. Раздел 6.4.6		1.0
VN MIN	Real	См. Раздел 6.4.6		0.8



### 13.13 OBST (Параметры препятствия)

Table 13.13: более подробно см. раздел 7.1.

OBST (Параметры препятствия)				
ALLOW_VENT	Logical	Allow vents on obstruction Позволяет вентиляционные отверстия на препятствии		.TRUE.
BNDF_FACE(-3:3)	Logical Array	См. Раздел 12.2.6		.TRUE.
BNDF_OBST	Logical	См. Раздел 12.2.6		.TRUE.
COLOR	Character	Color name of obstruction color Цвет препятствия		
CTRL_ID	Character	ID of Controlling ConTRoL Идентификатор функции управления		
DEVC_ID	Character	ID of Controlling DEViCe Идентификатор функции устройства		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не влияет на работу программы)		
OUTLINE	Logical	Draw as Outline Обрисовать контур		.FALSE.
PERMIT_HOLE	Logical	Allow a Hole Позволяет наличие отверстия в препятствии		.TRUE.
REMOVABLE	Logical	Allow obstruction to be removed Позволяет удалить препятствие		.TRUE.
RGB(3)	Integer Triplet	Color indices (0 -255) Цветовые показатели (0-255)		
SAWTOOTH	Logical	См. Раздел 7.1.1		.TRUE.
SURF_ID	Character	Associated Surface Ассоциативная поверхность		
SURF_IDS(3)	Character Triplet	Associated Surfaces (top,side,bot.) Ассоциативные поверхности (верхняя, боковая и нижняя стороны)		
SURF_ID6(6)	Character Sextuplet	Associated Surfaces (like XB) Ассоциативные поверхности (такие как XB)		
THICKEN	Logical	Force at least one cell thick Делает препятствие как минимум в одну ячейку толщиной		.FALSE.
TEXTURE_ORIGIN(3)	Real Triplet	См. Раздел 8.6.1	м	(0.,0.,0.)
TRANSPARENCY	Real	Transparency indicator Индикатор прозрачности		1
XB(6)	Real Sextuplet	Min/Max Physical coordinates Мин./Макс. Физические координаты	м	

### 13.14 PART (Лагранжевы частицы/капли)

Таблица 13.14: более подробно см. раздел 10

PART (Лагранжевы Частицы/Капли)				
AGE	Real	Droplet life time/Продолжительность жизни капель	с	100000.
COLOR	Character	Default color of droplets Цвет капель по умолчанию		'BLACK'
DENSITY	Real	Droplet density Плотность капли	Кг/м <sup>3</sup>	1000.
DIAMETER	Real	Median Volumetric Diameter Средний объемный диаметр	мк	500.
DROPLETS_PER_SECOND	Integer	Drops per second per head Капель в секунду из 1 разбрызгивателя		1000
DT_INSERT	Real	Time between particle insertions Время между выпуском частиц	с	0.05
EVAPORATE	Logical	Assume liquid evaporation Допустить испарение жидкости		.TRUE.
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка примечаний (не выполняется)		
FUEL	Logical	Liquid Fuel Жидкое топливо		.FALSE.
GAMMA_D	Real	Parameter for size distribution Параметр распределения размеров частиц		2.4
HEAT_OF_COMBUSTION	Real	Heat of Combustion Теплота сгорания	кДж/кг	
HEAT_OF_VAPORIZATION	Real	Latent Heat of Vaporization Латентная теплота испарения	кДж/кг	2259.
HORIZONTAL_VELOCITY	Real	Droplet speed, horizontal Горизонтальная скорость капли	м/с	0.2
ID	Character	Identifier/Идентификатор		
INITIAL_TEMPERATURE	Real	Initial Temperature Начальная температура	°C	TMPA
MASSLESS	Logical	Massless tracers Невесомые частицы		.FALSE.
MASS_PER_VOLUME	Real	Droplet mass per unit volume Масса капли на единицу объема	Кг/м <sup>3</sup>	1.
MAXIMUM_DIAMETER	Real	Above which droplet breaks up Максимальный диаметр, большие капли распадаются	мк	∞
MINIMUM_DIAMETER	Real	Below which droplet evaporates	мк	20.

		Минимальный диаметр, меньшие капли испаряются		
MELTING_TEMPERATURE	Real	Melting Temperature Температура таяния	°C	0.
MONODISPERSE	Logical	Uniform droplet size Стандартный размер капель		.FALSE.
NUMBER_INITIAL_DROPLETS	Integer	Number of droplets at start Количество капель на начало расчета		0
QUANTITIES(10)	Character	Quantities for coloring Величины для обозначения цвета		
RGB(3)	Integers	Color indices (0-255) Индексы цвета (0-255)		
SAMPLING_FACTOR	Integer	Filter for output file Фильтр для выходного файла		1
SIGMA_D	Real	Parameter for distribution by sizes		
SPEC_ID	Character	Name of gas species Наименование газообразного вещества		
SPECIFIC_HEAT	Real	Droplet specific heat Теплоемкость капли	кДж/кг/К	4.184
STATIC	Logical	Stationary Particles Неподвижные частицы		.FALSE.
VAPORIZATION_TEMPERATURE	Real	Liquid Droplet Boiling Temp Температура кипения жидкой капли	°C	100.
VERTICAL_VELOCITY	Real	Droplet speed, vertical Вертикальная скорость капли	м/с	0.5
XB(6)	Real	Initial particle placement region первоначальная зона расположения частицы	м	
WATER	Logical	Water Droplet Капля воды		.FALSE.

### 13.15 PROF (Параметры профиля стены)

Таблица 13.15: более подробно см. раздел 12.2.4

PROF Параметры профиля стены				
IOR	Real	Orientation of wall surface поверхности стены	направление	
ID	Character	Identifier Идентификатор		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
QUANTITY	Character	Name of output quantity Название выходного параметра		
XYZ	Real Triplet	Coordinates of wall surface Координаты поверхности стены	м	

### 13.16 PROP (Свойства устройства)

Таблица 13.16: более подробно см. раздел 11.3

PROP (Свойства устройства)				
ACTIVATION_TEMPERATURE	Real	Threshold link temperature Пороговое значение температуры	°C	74
ACTIVATION_OBSCURATION	Real	Threshold value of obscuration Пороговое значение затемнения	%/м	3.28
ALPHA_C	Real	Smoke detector parameter Параметр датчика дыма		1.8
ALPHA_E	Real	Smoke detector parameter Параметр датчика дыма		0.0
BETA_C	Real	Smoke detector parameter Параметр датчика дыма		1.0
BETA_E	Real	Smoke detector parameter Параметр датчика дыма		1.0
BEAD_DIAMETER	Real	Diameter of TC bead Диаметр ТС пузырька	м	0.001
BEAD_EMISSIVITY	Real	Emissivity of TC bead Коэффициент излучения ТС пузырька		0.85
C_FACTOR	Real	Sprinkler activation parameter Параметр активации спринклера		0.
CHARACTERISTIC_VELOCITY	Real	См. раздел 12.3.9	м/с	1.0
DROPLET_VELOCITY	Real	Initial droplet velocity Начальная скорость капли	м/с	5.0
FLOW_RATE	Real	Sprinkler or nozzle flow rate Скорость потока спринклера или распылителя	л/мин	
FLOW_RAMP	Character	TimeRAMP for flow Линейное изменение потока во времени		
FLOW_TAU	Real	Time constant for flow Постоянная времени для потока		0.0
GAUGE_TEMPERATURE	Real	См. раздел 12.3.5	°C	TMPA
ID	Character	IDentifier/Идентификатор		
INITIAL_TEMPERATURE	Real	Initial link temperature Исходная температура звена	°C	TMPA
K_FACTOR	Real	Flow parameter Параметр потока	л/мин /атм <sup>1</sup> /2	1.
LENGTH	Real	Smoke detector parameter Параметр датчика дыма		1.8
OFFSET	Real	Droplet offset distance Интервал смещения капли	м	0.05
OPERATING_PRESSURE	Real	Sprinkler pipe pressure Давление спринклера	Атм	1.

PART_ID	Character	Name of associated PARTline Название соответствующей строки PART		
QUANTITY	Character	Name of associated output Название соответствующих выходных данных		
RTI	Real	Response Time Index Индекс времени отклика	$\sqrt{\text{м с}}$	100.
SMOKEVIEW_ID	Character	Name of drawn object Наименование нарисованных объектов		
SPRAY_ANGLE(2)	Real	Cone angles for water spray Углы конусности для водяного спринклера	градусы	60.,75.
SPRAY_PATTERN_TABLE	Character	TABL for spray pattern Таблица для схемы распыления		

### 13.17 RADI (Параметры излучения)

Таблица 13.17: более подробно см. раздел 9.4

RADI Параметры излучения				
ANGLE_INCREMENT	Integer	Number of angles skipped per update Количество углов, пропущенных за обновление		5
CH4_BANDS	Logical	Include extra fuel bands Включить дополнительные полосы топлива		.FALSE.
KAPPA0	Real	Constant absorption coefficient Постоянный коэффициент поглощения	1/м	0
NMIEANG	Integer	Number of polar angles Количество полярных углов		15
NUMBER_RADIATION_ANGLES	Integer	Number of solid angles Количество телесных углов		104
PATH_LENGTH	Real	Path length for radiation calc. Длина пути для расчета излучения	м	
RADIATIVE_FRACTION	Real	Radiative Loss Fraction Доля излучательных потерь		0.35
RADTMP	Real	Assumed radiative source temp. Предполагаемая температура источника излучения	°C	900
TIME_STEP_INCREMENT	Integer	Number time steps skipped Количество пропущенных шагов по времени		3
WIDE_BAND_MODEL	Logical	Non-gray gas assumption Приближение не-серого газа		.FALSE.

### 13.18 RAMP (Функция параметров RAMP)

Таблица 13. 18: более подробно см. раздел 8.5

RAMP (Функция параметров RAMP)				
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
F	Real	Function value Значение функции		
ID	Character	Identifier Идентификатор		
T	Real	Time (or Temperature) Время (или Температура)	с (или °C)	

### 13.19 REAC (Параметры реакции)

Таблица 13.19: более подробно см. раздел 9.1

REAC (Параметры Реакции)				
BOF	Real	Pre-exponential Factor (Finite Rate) Предэкспоненциальный множитель (конечная скорость)	См <sup>3</sup> /моль/с	
C	Real	Carbon atoms in fuel Атомы углерода в топливе		3
CO_YIELD	Real	Fraction of CO from the fuel Доля CO в топливе	кг/кг	0
CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE	Real	Suppression criterion Критерий подавления	°C	1427
E	Real	Activation Energy (Finite Rate) Энергия активации (конечная скорость)	кДж/кмоль	
EPUMO2	Real	Energy per Unit Mass Oxygen Энергия на единицу массы кислорода	кДж/кг	13100
FUEL	Character	Name of Fuel (Finite Rate) Название топлива (конечная скорость)		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не исполняется)		
H	Real	Hydrogen atoms in fuel атомы водорода в топливе		8
H2_YIELD	Real	Fraction of H2 from the fuel Доля H <sub>2</sub> в топливе	Кг/кг	0
HEAT_OF_COMBUSTION	Real	Energy per Unit Mass Fuel Энергия на единицу массы топлива	кДж/кг	
HRRPUA_SHEET	Real	Upper limit on flame HRR Верхний предел HRR пламени	кВт/м <sup>2</sup>	200.
ID	Character	Identifier Идентификатор		
IDEAL	Logical	Adjust for minor product yields		.FALSE

		Настройка для образования второстепенного продукта		
MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT	Real	Visibility parameter Параметр видимости	М <sup>2</sup> /кг	8700.
MAXIMUM_VISIBILITY	Real	Visibility parameter Параметр видимости	м	30
MW_OTHER	Real	Molecular Weight of OTHER Молекулярный вес OTHER/других	г/моль	28
N	Real	Nitrogen atoms in the fuel Атомы азота в топливе		0
N_S(N)	Real	Arrhenius Exponents (Finite Rate) Экспоненты Аррениуса (конечная скорость)		
NU(N)	Real	Reaction stoichiometry (Finite Rate) Стехиометрия реакции (конечная скорость)		
O	Real	Oxygen atoms in the fuel Атомы кислорода в топливе		0
OTHER	Real	Other atoms in the fuel Другие атомы в топливе		0
OXIDIZER	Character	Name of Oxidizer (Finite Rate) Название окислителя (конечная скорость)		
SOOT_YIELD	Real	Fraction of soot from the fuel Доля сажи от топлива	кг/кг	0.01
SOOT_H_FRACTION	Real	Atom fraction of hydrogen in soot Доля атомов водорода в саже		0.1
VISIBILITY_FACTOR	Real	Visibility parameter Параметр видимости		3
X_O2_LL	Real	Lower Oxygen Limit Нижний предел кислорода	моль/моль	0.15
Y_F_INLET	Real	Mass Frac. of Fuel in Burner Массовая доля топлива в горелке	кг/кг	1.0
Y_F_LFL	Real	Lower Fuel limit (mass fraction) Нижний предел топлива (массовая доля)	Кг/кг	0.0
Y_O2_INFTY	Real	Ambient Oxygen Mass	Кг/кг	0.23



		Frac. Массовая доля кислорода во внешней среде		
--	--	---	--	--

### 13.20 SLCF (Параметры послойного файла)

Таблица 13.20: Более подробно см. раздел 12.2.5

SLCF (Параметры послойного файла)				
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не исполняется)		
MESH_NUMBER	Integer	Save only slices in this mesh Слои для записи исключительно в выбранной сетке		
PBX	Real	x-plane to save slice file плоскость x для записи послойного файла		
PBY	Real	y-plane to save slice file плоскость y для записи послойного файла		
PBZ	Real	z-plane to save slice file плоскость z для записи послойного файла		
QUANTITY	Character	Name of Quantity to display Название величины для отображения		
VECTOR	Logical	Include flow vectors Включать векторы потока		.FALSE.
XB(6)	Real Sextuplet	Min/Max coordinates of region to save Мин/макс. Координаты области для записи	м	

### 13.21 SPEC (Параметры веществ)

Таблица 13.21: более подробно см. раздел 9.2

SPEC (Параметры веществ)				
ABSORBING	Logical	Gas species absorbs radiation Поглощение излучения газообразными веществами		.FALSE.
CONDUCTIVITY	Real	Conductivity $k$ Проводимость $k$	Вт/м/К	
DIFFUSIVITY	Real	Diffusivity $D$ Коэффициент диффузии $D$	м <sup>2</sup> /с	
EPSILONKLJ	Real	Leonard-Jones Parameter Параметр Леонарда-Джонса		0
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
ID	Character	Name of species Название вещества		
MASS_FRACTION_0	Real	Initial mass fraction Начальная массовая доля		0
MW	Real	Molecular Weight Молекулярная масса	г/моль	29.

SIGMALJ	Real	Leonard-Jones Parameter Параметр Леонарда-Джонса		0
VISCOSITY	Real	Dynamic Viscosity <i>mu</i> Динамическая вязкость	кг/м/с	

### 13.22 SURF (Свойства поверхности)

Таблица 13.22: более подробно см. раздел 8.2

SURF (Surface Properties) Свойства поверхности				
ADIABATIC	Logical	Adiabatic thermal BC Адиабатические граничные условия		.FALSE.
BACKING	Character	Back boundary condition Граничное условие на изнанке		'VOID'
BURN_AWAY	Logical	Object can vanish Объект может исчезнуть		.FALSE.
CELL_SIZE_FACTOR	Real	См. раздел 8.4.5		1.0
COLOR	Character	Surface Color Цвет поверхности		
CONVECTIVE_HEAT_FLUX	Real	Heat flux at surface Тепловой поток у поверхности	кВт/м <sup>2</sup>	0.
DUCT_PATH	Integer Pair	Pressure Zones for fans Зоны давления для вентиляторов		0,0
E_COEFFICIENT	Real	Extinguishing coefficient Коэффициент затухания	1/с	0.
EMISSIVITY	Real	Emissivity Коэффициент излучения		0.9
EXTERNAL_FLUX	Real	Heat flux to surface Тепловой поток к поверхности	кВт/м <sup>2</sup>	0.
FYI	Character	Comment String Строка комментариев		
GEOMETRY	Character	Geometry type Тип геометрии		'CARTESIAN'
HEAT_OF_VAPORIZATION	Real	For specified HRR only Теплота испарения (Только для заданной HRR)	кДж/кг	0.
HRRPUA	Real	HRR Per Unit Area Скорость тепловыделения на единицу площади	кВт/м <sup>2</sup>	0.
ID	Character	IDentifier Идентификатор		
IGNITION_TEMPERATURE	Real	Ignition temperature Температура зажигания	°C	5000.
LEAK_PATH	Integer Pair	Pressure Zones for leakage Зоны давления для утечки		
MASS_FLUX(I)	Real Array	For species I Для вещества I		0.

MASS_FLUX_TOTAL	Real	Total Mass Flux Общий поток массы		
MASS_FRACTION(I)	Real Array	For species I Для вещества I		
MATL_ID	Char. 2D Array	(Layer,Component) (слой, компонент)		
MATL_MASS_FRACTION	Real 2D Array	(Layer,Component) (слой, компонент)		
MAX_PRESSURE	Real	Max over-pressure for fan Макс. избыточное давление для вентилятора	Па	1E12
MLRPUA	Real	Mass loss rate per unit area Скорость потери в массе на единицу площади	кг/м <sup>2</sup> с	0.
NPPC	Integer	Number of particles per cell Количество частиц на ячейку		1
PARTICLE_MASS_FLUX	Real	См. Раздел 10.2	кг/м <sup>2</sup> с	0.
PART_ID	Character	Lagrangian Particle ID ID лагранжевой частицы		
POROUS	Logical	См. Раздел 8.2.3		.FALSE
PLE	Real	Atmospheric profile exponent Экспонента атмосферной кривой		0.3
PROFILE	Character	Name of velocity profile Название кривой скорости		
RAMP_MF(I)	Character	Ramp ID for species I ID линейного изменения для вещества I		
RAMP_Q	Character	Ramp ID for HRR ID линейного изменения для HRR		
RAMP_T	Character	Ramp ID for temp. ID линейного изменения для температуры		
RAMP_V	Character	Ramp ID for velocity ID линейного изменения для скорости		
RGB(3)	Integer Triplet	Color indices (0-255) Индексы цвета (0-255)		255,204,1 02
SHRINK	Logical	Shrinking material Сжимание материала		.TRUE.
SLIP_FACTOR	Real	Velocity Slip Condition Условие проскальзывания скорости		0.5
STRETCH_FACTOR	Real	См. раздел 8.4.5		2.0
TAU_MF(I)	Real Array	Ramp time for species I Время линейного изменения для вещества I	с	1.
TAU_Q	Real	Ramp time for HRR Время линейного изменения для HRR	с	1.

TAU_T	Real	Ramp time for temp. Время линейного изменения для температуры	с	1.
TAU_V	Real	Ramp time for velocity Время линейного изменения для скорости	с	1.
TEXTURE_HEIGHT	Real	Height of texture image Высота текстурного изображения	м	1.
TEXTURE_MAP	Character	Name of texture map file Название файла текстуры		
TEXTURE_WIDTH	Real	Width of texture image Ширина текстурного изображения	м	1.
THICKNESS(IL)	Real Array	Thickness of Layer IL Толщина слоя IL	м	0.
TMP_BACK	Real	Back surface temperature BC Температура задней поверхности	°C	20.
TMP_FRONT	Real	Front surface temperature Температура передней поверхности	°C	20.
TMP_INNER	Real	Initial solid temperature Начальная температура твёрдого тела	°C	20.
TRANSPARENCY	Real	Transparencyof obstruction Прозрачность препятствия	1	
VEL	Real	Normal velocity Нормальная скорость	м/с	0.
VEL_T	Real Pair	Tangential velocity comps. Тангенциальные составляющие скорости	м/с	0.
VOLUME_FLUX	Real	Normal velocity x vent area Нормальная скорость на площадь вентиляционного канала	м <sup>3</sup> /с	0.
Z0	Real	Atmospheric profile origin Начало отсчета атмосферной кривой	м	10.

### 13.23 TABL (Параметры таблицы)

Таблица 13.23: Более подробно см. раздел 8.5

TABL (Параметры таблицы)				
ID	Character	IDentifier Идентификатор		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
TABLE_DATA	Real Array	Data for one row of the table Данные для одной строки таблицы		

### 13.24 TIME (Параметры времени)

Таблица 13.24: Более подробно см. раздел 6.2

TIME Временные параметры				
DT	Real	Initial time step Начальный шаг по времени	c	
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
SYNCHRONIZE	Logical	Sync time step of multiple meshes Синхронизировать шаг по времени составных сеток		.TRUE.
T_BEGIN	Real	Starting time for calculation Время запуска расчетов	c	0.
T_ENDorTWFIN	Real	Ending time for calculation Время окончания расчетов	c	1
WALL_INCREMENT	Integer	Time steps between 1D wall solution updates Шаги по времени между обновлениями одномерного решения для стены		2

### 13.25 TRNX, TRNY, TRNZ (Преобразования сетки)

Таблица 13.25: Более подробно см. раздел 6.3.3

TRNX, TRNY, TRNZ (преобразования сетки)				
CC	Real	Computational coordinate Вычислительная координата	M	
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
IDERIV	Integer	Order of polynomial transformation Порядок полиномиального преобразования		
MESH_NUMBER	Integer	Number of mesh to transform Номер сетки для преобразования		
PC	Real	Physical coordinate or derivative Физическая координата или производная		

### 13.26 VENT (параметры вентиляционного отверстия)

Таблица 13.26: Более подробно см. раздел 7.3

VENT Параметры вентиляционного канала				
COLOR	Character	См. раздел 8.6		
CTRL_ID	Character	ID of Control Function ID управляющей функции		

DEVC_ID	Character	ID of Controlling Device ID управляющего устройства		
FYI	Character	Comment String (has no effect) Строка комментариев (не выполняется)		
IOR	Integer	Orientation Index Индекс направления		
MASS_FRACTION(N)	Real Array	Mass Fraction of species Nat OPEN vent Массовая доля вещества N на OPEN (открытой) границе	кг/кг	
MB	Character	Mesh Boundary Граница сетки		
OUTLINE	Logical	Draw vent as outline Изобразить вентиляционный канал как схему		.FALSE
PBX, PBY, PBZ	Real	Coordinate Plane Координатная плоскость		
RGB(3)	Integer Triplet	См. раздел 8.6		
SPREAD_RATE	Real	См. раздел 8.2.6	м/с	0.0
SURF_ID	Character	Associated Surface Прилегающая поверхность		'INERT'
TEXTURE_ORIGIN(3)	Real Triplet	См. раздел 8.6.1	м	(0.,0.,0.)
TMP_EXTERIOR	Real	Temperature at OPEN vent Температура в OPEN (открытом) вентиляционном отверстии	°C	
TRANSPARENCY	Real	Transparency indicator Индикатор прозрачности		1.0
XB(6)	Real Sextuplet	Min/Max physical coordinates Мин/макс. физические координаты	м	
XYZ(3)	Real Triplet	См. раздел 8.2.6	м	

### 13.27 ZONE (Параметры зоны давления)

Таблица 13.27: Более подробно см. раздел 8.3

ZONE (Параметры зоны давления)				
ID	Character	IDentifier Идентификатор		
LEAK_AREA(N)	Real	Leakage area to pressure zone N Площадь протекания к зоне давления N	м <sup>2</sup>	0
XB(6)	Real Sextuplet	Coordinates of Zone Координаты зоны	м	

## Глава 14

### Преобразование входных файлов более ранних версий в FDS 5

В последней версии FDS 5 сделано много изменений и усовершенствований. Чтобы преобразовать входные данные файла FDS 4 в новую версию программы, FDS 5, необходимо внести некоторые изменения в файл. В этом разделе будут указаны все изменения, которые должны быть внесены, для того чтобы преобразовать входной файл FDS 4 в новый формат FDS 5.

#### 14.1 Параметры численного домена: GRID и PDIM

В предыдущих версиях, вычислительный домен и численная сетка были заданы строками формулы:

```
&GRID IBAR=30, JBAR=20, KBAR=10 /&PDIM XBAR0=0.0, XBAR=3.0, YBAR0=0.0,  
YBAR=2.0, ZBAR0=0.0, ZBAR=1.0 /
```

В FDS 5, эти две строки заменены одной:

```
&MESH IJK=30,20,10, XB=0.0,3.0,0.0,2.0,0.0,1.0 /
```

Для составных и преобразованных сеток применяются те же правила.

#### 14.2 Препятствия, вентиляционные отверстия и отверстия: OBST, VENT, и HOLE

Синтаксис этих строк достаточно схож с предыдущими версиями, за исключением следующего:

- Для VENT (вентиляционного отверстия), которое охватывает внутреннюю границу сетки CB='XBAR0' теперь MB='XMIN'. Символьная строка 'XBAR' теперь 'XMAX'. То же самое применяется в параметрах координаты  $y$  и  $z$ .
- Управляющие параметры как T\_ACTIVATE, HEAT\_REMOVE и т.д., объединены в DEVC\_ID и CTRL\_ID. Словом, любые изменения в препятствии, вентиляционном отверстии или в отверстии связаны с определенными устройствами или функцией управления. Для дополнительной информации см. Главы 11.1 и 11.5.

#### 14.3 Параметры поверхности: SURF

Самое значительное изменение в формате входного файла - это разделение строки SURF. В предыдущих версиях, группа SURF включала в себя всю информацию об определенном типе границы – свойства материала, цвет, толщина и т.д. Однако в FDS 5, границы твердого тела могут состоять из составных слоев, так что использование старых SURF было бы слишком громоздким. Поэтому создана новая группа MATL, содержащая только необходимые соединения данного материала. Если раньше применялась одна строка.

```
&SUR ID = 'BRICK WALL'  
RGB = 0.6,0.2,0.2  
KS = 0.69  
C_P = 0.84  
DENSITY = 1600.  
BACKING = 'EXPOSED'  
THICKNESS = 0.20 /
```

то теперь данные вводятся в двух строках:

```
&MATL ID           = 'BRICK'  
  CONDUCTIVITY     = 0.69  
  SPECIFIC_HEAT    = 0.84  
  DENSITY          = 1600. /  
  
&SURF ID           = 'BRICK WALL'  
MATL_ID            = 'BRICK'  
RGB                = 166,41,41  
BACKING            = 'EXPOSED'  
THICKNESS          = 0.20 /
```

Задание поверхности не изменилось, например:

```
&OBST      XB=0.1, 5.0, 1.0, 1.2, 0.0, 1.0, SURF_ID='BRICK WALL' /
```

Соответственно, обратите внимание на изменение названий тепловых свойств  $K_S$  и  $C_P$  в  $CONDUCTIVITY$  (удельная электропроводность) и  $SPECIFIC\_HEAT$  (теплоемкость). Имейте в виду, что цвет  $RGB$  задается целыми числами от 0 до 255 вместо действительных чисел от 0.0 до 1.0. Еще лучше, использовать только  $COLOR$  (цвет) из Таблицы 8.1.

#### 14.4 Параметры реакции: REAC

В большинстве случаев, задание реакции горения становится легче. В предыдущих версиях необходимо было задавать топливо, его молекулярный вес, выход сажи и/или  $CO$  и идеальную стехиометрию реакции:

```
&REAC ID           = 'PROPANE'  
  FYI              = 'C_3 H_8'  
  MW               = 44.  
  SOOT_YIELD       = 0.01  
  NU_O2            = 5.  
  NU_CO2           = 3.  
  NU_H2O           = 4. /
```

Теперь, нужно описать состав молекулы топлива и неидеальное значение выхода продуктов реакции. На основе этих данных,  $FDS 5$  вычисляет необходимое:

```
&REAC ID           = 'PROPANE'  
  SOOT_YIELD       = 0.01  
  C                = 3.  
  H                = 8. /
```

#### 14.5 Параметры устройств: SPRK, HEAT, THCP

Предыдущие версии  $FDS$  включали в себя разные способы задания устройств. Например, спринклер описывался строкой:

```
&SPRK      XYZ=4.5,6.7,3.6, MAKE='Acme_K-17', LABEL='spk_34' /
```

спринклер расположен в точке  $XYZ$ , а свойства спринклера описаны в файле, который **Acme\_K-17.spk**. Тепловой датчик и датчик дыма задавались строками формулы:



```
&SMOD XYZ=4.5,6.7,3.6, LENGTH=2.6, ACTIVATION_OBSCURATION=1.4,  
LABEL='sd_34' /  
&HEAT XYZ=4.5,6.7,3.6, RTI=45., ACTIVATION_TEMPERATURE=74.,  
LABEL='hd_39' /
```

В FDS 5, все эти устройства задаются одним и тем же способом:

```
&PROP ID='Acme_K-17', QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',  
RTI=148., C_FACTOR=0.7,  
ACTIVATION_TEMPERATURE=74., PART_ID='water drops', FLOW_RATE=189.3,  
DROPLET_VELOCITY=10., SPRAY_ANGLE=30.,80. /
```

Точечные выходные данные, получаемые через «термопары» (THCP), теперь задаются «устройствами» (DEVC):

```
&DEVC XYZ=0.7,0.9,2.1, QUANTITY='WALL_TEMPERATURE', IOR=-2, ID='probe_2' /
```

Синтаксис старой группы THCP не изменился. Просто замените DEVC на THCP, а LABEL на ID. В FDS 5 входные записи указываются через ID.

## **Часть III**

# **Типовая выборка и проверка адекватности**

## Глава 15

### Методы проверки адекватности модели

В ASTM E 1355 [14] описаны методы оценки математической и численной устойчивости детерминированных моделей пожара. Данный процесс, известный как *проверка адекватности* модели, обеспечивает точность численного решения основных уравнений. К этим методам относится сопоставление с аналитическими решениями, проверка кода программы и численные тесты. В этой главе приводятся описания аналитических решений, примеры и сравнения с ними.

#### 15.1 Сопоставление с аналитическими решениями

Большинство комплексных процессов горения, в том числе пожары, являются турбулентными и зависящими от времени. Для полностью турбулентных, зависящих от времени уравнений Навье-Стокса нет точных решений в замкнутом виде. Вычислительная гидродинамическая модель дает приближенное решение нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных при помощи их замены на дискретизированные алгебраические уравнения, которые можно решать с помощью мощного компьютера. Несмотря на то, что общего аналитического решения для полностью турбулентных потоков не существует, некоторые субмодели описывают явления, для которых есть аналитические решения, например, одномерную теплопроводность в твердом теле. Данные аналитические решения могут использоваться для тестирования субмоделей в комплексной программе, такой как FDS. Разработчики программы FDS регулярно используют данные методы для проверки правильности кодировки модели [15,16]. Такие методы верификации довольно просты и являются общепринятыми и результаты проверок не всегда публикуются или включаются в документацию. К примерам стандартных аналитических проверок относятся следующие:

- Решатель излучения проверяется при помощи сценариев, в которых простые объекты, такие как кубы или плоские пластины находятся в герметичных помещениях. Конвективное движение полностью отключается, объекту задается фиксированная температура поверхности и коэффициент излучения равен единице (таким образом, объект становится излучателем Планка). Тепловой поток в холодные окружающие стены записывается и сравнивается с аналитическими решениями. Эти исследования помогают определять необходимое количество телесных углов, которые можно установить в качестве значений по умолчанию.
- Твердые предметы нагреваются постоянным тепловым потоком, а внутренняя и поверхностная температура в качестве функции времени сравниваются с аналитическими решениями одномерного уравнения теплообмена. Эти исследования помогают определить количество узлов для использования в модели теплообмена в твердой фазе. Аналогичные исследования проводятся при проверке моделей пиролиза для термопластичных и обугливающих твердых тел.
- Гидродинамический решатель, ставший основой программы FDS, на ранних стадиях разработки проверялся на соответствие аналитическим решениям упрощенных потоков жидкости. Эти исследования проводились Национальным бюро стандартов (NBS)<sup>1</sup>, а именно Ремом, Баумом и их коллегами [17,18,19,20]. Основной задачей данной ранней работы была проверка стабильности и последовательности основного

---

<sup>1</sup> Национальный институт стандартов и технологий (НИСТ) ранее именовался Национальным бюро стандартов.

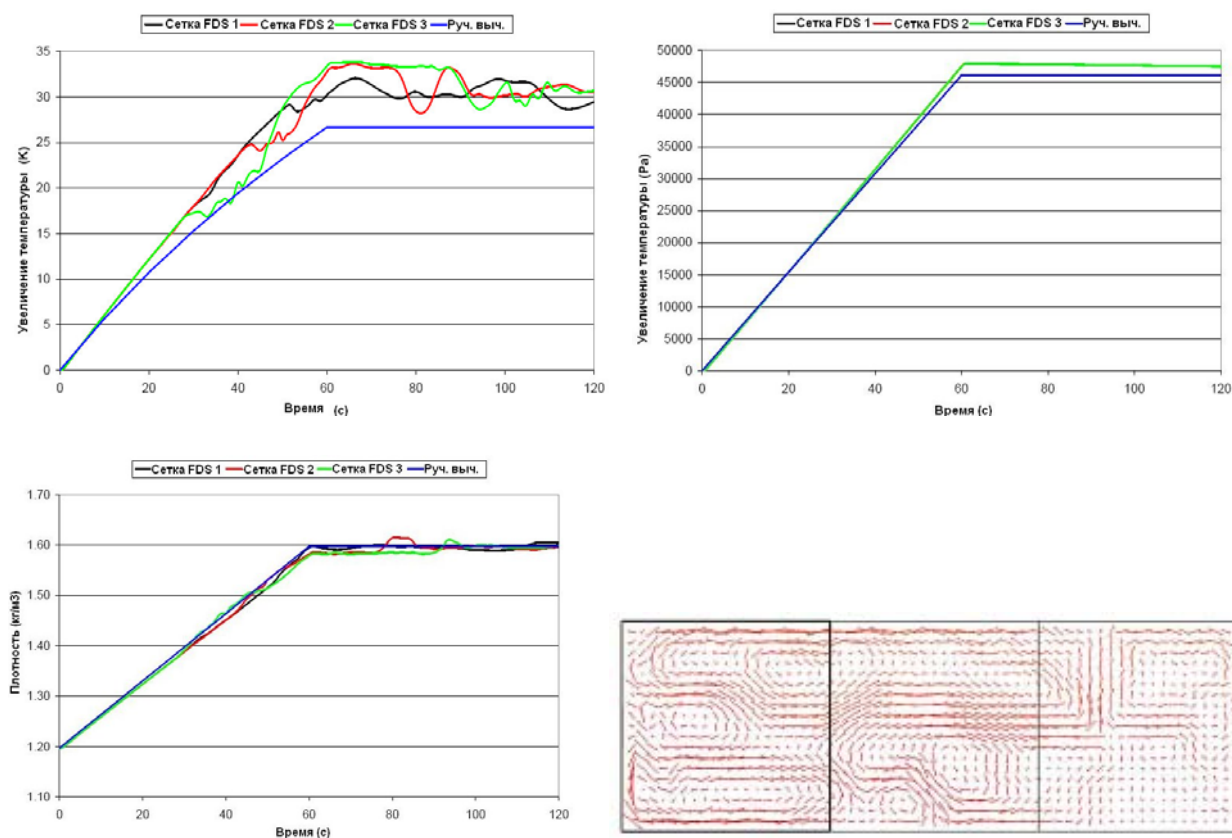
гидродинамического решателя, в особенности взаимосвязи скорости и давления, крайне важной в приложениях с низкими числами Маха. Большинство численных алгоритмов, разработанных в тот период, предназначались для использования в приложениях высокоскоростных потоков, таких как аэрокосмические. Многие технологии, использованных в FDS, изначально разрабатывались для атмосферных моделей, и поэтому требовали проверок для определения того, можно ли их использовать для описания соответственно низкоскоростного потока в помещениях.

- На ранних стадиях разработки программы FDS Рем и Баум приняли принципиальное решение использовать для давления прямой решатель (а не итерационный). В приближении низкого числа Маха для уравнений Навье-Стокса появляется дифференциальное эллиптическое уравнение в частных производных для давления, именуемое уравнением Пуассона. Во многих методах CFD используются итерационные методы для решения основных уравнений сохранения, чтобы избежать необходимости напрямую решать уравнение Пуассона. Причина в следующем: на решение уравнения требуется много времени при вычислении на любых других сетках, кроме прямолинейных. Учитывая, что программа FDS разработана специально для прямолинейных сеток, она может использовать быстрые прямые решатели уравнения Пуассона, получая поле давления с одним проходом через решатель для машинной точности. В FDS используются арифметические операции с двойной точностью (8 байт), то есть относительная разность между найденным и точным решениями дискретизированного уравнения Пуассона составляет порядка  $10^{-12}$ . Точность численного решения всей системы уравнений зависит от взаимосвязи давления и скорости, так как часто расчеты состоят из сотни тысяч временных шагов, причем каждый временной шаг состоит из двух решений уравнения Пуассона для сохранения точности второго порядка. Без использования прямого уравнения Пуассона, накопление численных ошибок в ходе расчета могло бы привести к ложным результатам. Действительно, попытка использовать арифметические операции с одинарной точностью (4 байта) для сбережения памяти ПК привела к ложным результатам, просто потому, что ошибки каждого временного шага в итоге накопились до недопустимой степени.

## 15.2 Термодинамика

### 15.2.1 Повышение давления в изолированном помещении (pressure\_rise)

В этом примере испытывается несколько базовых функций FDS. В узкий канал 3 м длиной, 0,002 м шириной и 1 м высотой вдувается воздух со скоростью 0,1 кг/м<sup>2</sup>/с на площади 0,2 м x 0,002 м за 60 с, с линейным возрастанием и линейным убыванием за 1 секунду. Общая масса воздуха в канале на начало равна 0,00718 кг. Общая масса выпущенного воздуха равна 0,00244 кг. Предполагается, что домен двухмерный, стены адиабатические, а STRATIFICATION в положении .FALSE. Домен разделен на три сетки, каждая имеет длину 1 м и одинаковую разбивку. Мы ожидаем, что давление, температура и плотность будут расти в течение 60 секунд вдувания воздуха. После этого температура, плотность и давление должны остаться постоянными. Расчеты вручную производятся с 10-секундными интервалами по первому закону термодинамики и уравнению состояния. Числа, приведенные ниже, показывают результаты этой проверки. Как мы видим, плотность полностью совпадает, что означает, что FDS впускает нужное количество массы и должным образом инициализирует домен. Тем не менее, давление и температура повышаются на 3% и 12% выше ожидаемого соответственно. Также на интервале от 60 с до 120 с наблюдается небольшое снижение давления, показывая, что текущее выполнение адиабатического граничного условия имеет в себе небольшую ошибку.



### 15.2.2 Утечка и вентиляторы в изолированном помещении (*leak\_test and leak\_test\_2*)

Новая функция FDS 5 состоит в идее «зоны давления». В отличие от моделей традиционного пожарного отсека или «зоны» с огнем, при создании FDS не предполагалось наличие помещений, соединяющихся дверями или трубами. Наоборот, геометрия в FDS полностью определяется пользователем. Но все же есть некоторые функции более простых моделей, которые мы бы хотели сохранить. Например, утечка через маленькую трещину или циркуляция воздуха через вентиляционный ход. В следующем примере в простом пожарном отсеке (3,6 м x 2,4 м x 2,4 м) в одном конце установлен небольшой вентилятор, а на другом конце под дверью - щель для утечки. В этом примере предполагается, что этот пожарный отсек содержится внутри большего отсека, который абсолютно герметичен. Вентилятор втягивает воздух внутрь пожарного отсека из внешнего пространства, увеличивая давление внутри и уменьшая снаружи. Стабильное состояние устанавливается тогда, когда объемный расход внутрь и наружу пожарного отсека уравниваются.

Объемный расход вентилятора определяется «кривой вентилятора»:

$$V_{fan} = A_{duct} U_{max} \text{sign}(\nabla p_{max} - \nabla p) \sqrt{\frac{|\nabla p - \nabla p_{max}|}{\nabla p_{max}}} \quad (15.1)$$

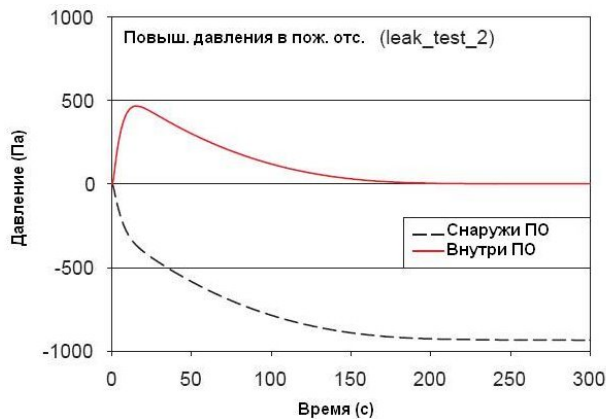
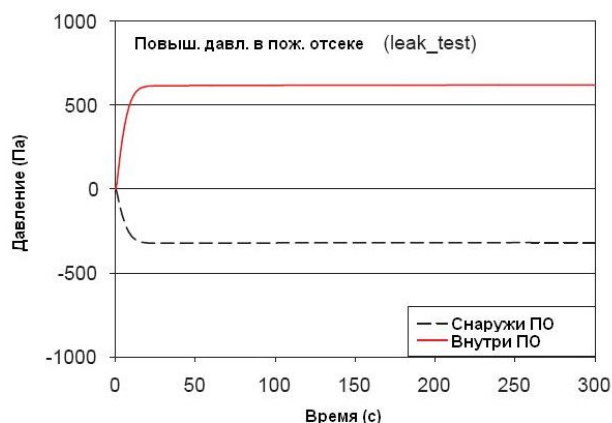
где  $\Delta p$  – разность давлений и  $A_{duct} = 0,16 \text{ м}^2$ ,  $U_{max} = 0,1 \text{ м/с}$  и  $\Delta p_{max} = 1000 \text{ Па}$ . Объемный расход через щель утечки задается выражением:

$$V_{leak} = A_{leak} \sqrt{\frac{2\nabla p}{\rho_{\infty}}} \quad (15.2)$$

где  $A_{leak} = 0,0001 \text{ м}^2$  и  $\rho_{\infty} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . После 5 минут разность давления составила 938,2 Па. Теоретическое значение, полученное путем уравнивания скорости объемных потоков вентилятора и утечки и нахождением  $\Delta p$ , равно 938,9 Па. Небольшая разница получилась из-за того, что границы твердого тела внутри вычислительного домена допускают небольшой объемный поток, относящийся к элементам численного решателя.

Из любопытства мы добавили еще одну щель для утечки из пожарного отсека, только в этот раз утечка была направлена наружу всего вычислительного домена, в бесконечную полость с давлением окружающей среды. Сейчас скорость потока вентилятора должна сбалансировать сумму скоростей потоков из двух щелей. После 5 минут разность давления составила 935,2 Па.

Два случая сведены на следующих графиках:



### 15.2.3 Кривые вентилятора (*fan\_test*)

В этом примере два герметичных пожарных отсека разделены общей стеной. Оба отсека считаются отдельными «зонами давления». Два вентилятора установлены на разделительной стене, дуют в противоположных направлениях. Входные данные для них следующие:

```
&SURF ID='BLOW LEFT', POROUS=.TRUE., VEL=-0.2, DUCT_PATH=1,2, MAX_PRESSURE=1000. /
&SURF ID='BLOW RIGHT', POROUS=.TRUE., VEL= 0.4, DUCT_PATH=2,1, MAX_PRESSURE=1000. /
```

```
&ZONE XB=-3.0, 0.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Pressure Zone 1
```

```
&ZONE XB= 0.0, 3.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Pressure Zone 2
```

```
&OBST XB= 0.0, 0.0,-1.0, 1.0, 0.0, 2.0 / Partition Wall
```

```
&HOLE XB=-0.1, 0.1,-0.1, 0.1, 0.4, 0.6 /
```

```
&OBST XB= 0.0, 0.0,-0.1, 0.1, 0.4, 0.6, ..., SURF_ID='BLOW RIGHT', PERMIT_HOLE=.FALSE.
```

```
&HOLE XB=-0.1, 0.1,-0.1, 0.1, 1.4, 1.6 /
```

```
&OBST XB= 0.0, 0.0,-0.1, 0.1, 1.4, 1.6, ..., SURF_ID='BLOW LEFT', PERMIT_HOLE=.FALSE. /
```

Объемный расход вентиляторов задается выражением:

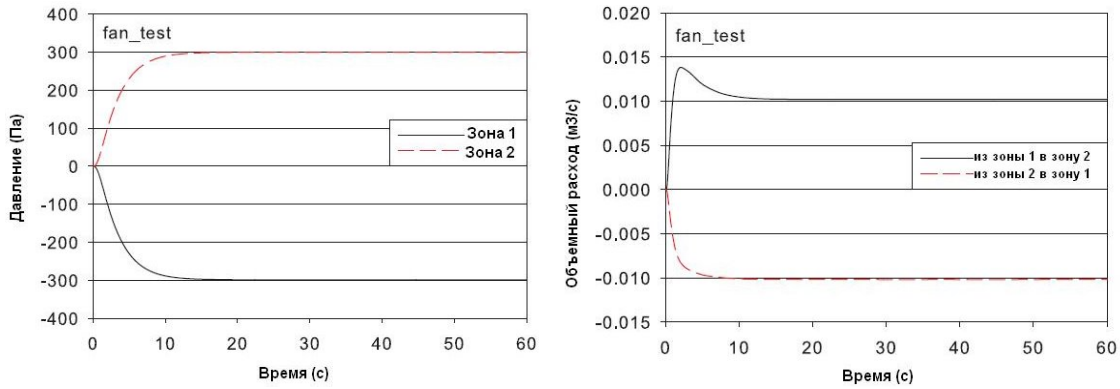
$$V_{fan} = A_{duct} U_{max} \text{sign}(\nabla p_{max} - \nabla p) \sqrt{\frac{|\nabla p - \nabla p_{max}|}{\nabla p_{max}}} \quad (15.3)$$

где  $A_{duct}$  – площадь канала (оба  $0,04 \text{ m}^2$ ),  $U_{max}$  – скорость воздуха ( $0,34 \text{ м/с}$  от зоны 1 до зоны 2 и  $0,2 \text{ м/с}$  от зоны 2 до зоны 1) и  $\Delta p_{max}$  максимальная разница давления, при которой может работать вентилятор (в этом случае оба вентилятора работают при  $1000 \text{ Па}$ ).

В устойчивом состоянии объемные расходы от отсека к отсеку (от зоны к зоне) должны быть одинаковыми и иметь противоположные знаки.

$$(0.04 \text{ m}^2)(0.4 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{|p_2 - p_1 - 1000 \text{ Pa}|}{1000 \text{ Pa}}} = (0.04 \text{ m}^2)(0.2 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{|p_2 - p_1 - 1000 \text{ Pa}|}{1000 \text{ Pa}}} \quad (15.4)$$

Решение  $p_2 = 300 \text{ Па}$  и  $p_1 = -300 \text{ Па}$ . Имейте в виду, что знак объемного потока в FDS обозначает движение потока в положительном или отрицательном координатном направлении. Это условие может сделать этот тип вычислений немного сложным.



#### 15.2.4 Эффект тяги (*stack\_effect*)

Если температура внутри здания отличается от температуры снаружи, возникают восходящие или нисходящие воздушные потоки внутри вентиляционных шахт или лестничных колодцев, соединенных с внешней средой каналами утечки. Это явление известно как эффект тяги. Контрольный пример **stack\_effect** – это двумерный расчет здания высотой 304 м с начальной температурой в 20°C и начальной температурой внешней среды 10°C. Два маленьких отверстия в здании описываются на высоте 2,5 м над первым этажом здания и 2,5 м под крышей здания.

Начальная стратификация плотности определяется допущением вертикального градиента в 0°C.

$$\rho_0(z) = \rho_{\infty} e^{\frac{\rho W}{200 \cdot T_0} z} \quad (15.5)$$

Применение этого в отношении внешних и внутренних помещений в нижних и верхних вентиляционных отверстиях дает значения плотности 1.2392, 1.1969, 1.1954 и 1.1546 кг/м<sup>3</sup> соответственно. FDS вычисляет те же самые значения в пределах машинной точности. Так как отверстия в здании расположены равномерно по всей высоте, нейтральная плоскость здания будет находиться близко к его середине. Градиент давления вдоль стены здания можно вычислить так:

$$\delta P = \frac{WP_0 g}{R_0} \left( \frac{1}{T_{ambient}} - \frac{1}{T_{building}} \right) h \quad (15.6)$$

где  $h$  – расстояние от нейтральной плоскости. Применение градиента давления в уравнении Бернулли (и предположение, что он будет постоянным) приводит к тому, что скорость равна 10,09 м/с в вентиляционном отверстии. FDS вычисляет наибольшую скорость в 10,13 м/с или ошибку в 0,5%.

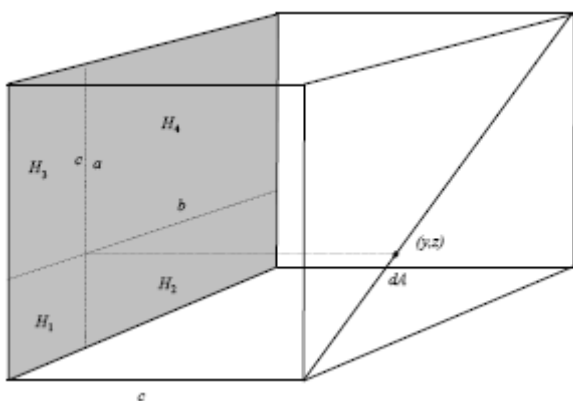


## 15.3 Излучение

В литературе по теплопередаче дается множество примеров точных решений уравнения переноса излучения для простых конфигураций холодных и горячих объектов.

### 15.3.1 Излучение внутри коробки (radiation\_in\_a\_box)

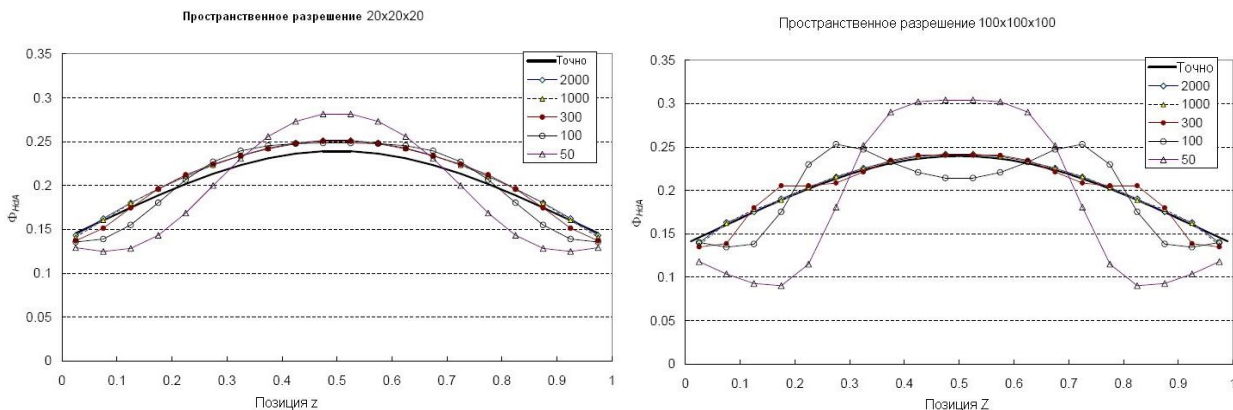
В этом примере проверяется вычисление фактора трехмерной конфигурации  $\Phi$  внутри куба с одной горячей стенкой и пятью холодными (0 K). Схема геометрии испытаний приведена на рисунке:



Факторы конфигурации вычисляются по диагонали холодной стены напротив горячей стены. Точные значения фактора конфигурации от плоского элемента  $dA$  до параллельного прямоугольника  $H$  вычисляются с помощью аналитического решения [21]

$(y,z)$	$\Phi H dA$	$(y,z)$	$\Phi H dA$
0.025	0.1457	0.275	0.2135
0.075	0.1603	0.325	0.2233
0.125	0.1748	0.375	0.2311
0.175	0.1888	0.425	0.2364
0.225	0.2018	0.475	0.2391

Разные варианты этого случая отличаются разрешением сетки ( $20^3$  и  $100^3$  ячеек) и количеством углов излучения (50, 100, 300, 1000, 2000). Точные результаты и результаты FDS приведены ниже:



### 15.3.2 Излучение от плоской пластины (radiation\_plane\_layer)

В этом примере проверяется вычисление трехмерного излучения от однородного, бесконечно широкой пластины излучающего материала. Температура слоя равна 1273,15 К, коэффициенты поглощения изменяются. Толщина слоя равна 1,0 м, а оптическая глубина 1,0 к. Температура стен равна 0 К. Результаты сравнивались с точным решением  $S(\tau)$ , приведенным в [22]

$$S(\tau) = S_b [1 - 2E_3(\tau)] \quad (15.7)$$

где  $S_b = \sigma T^4$  – тепловой поток черного тела от излучающей плоскости,  $E_3(\tau)$  – экспоненциальная интегральная функция (порядок 3) оптической глубины  $\tau$ .

Результаты FDS вычисляются в двух разрешениях сетки в направлении  $x$  ( $I=20$  и  $I=150$ ). Если  $I=20$ , то и однополосная, и шестиполосная версии включены, чтобы проверить правильную интеграцию тепловых потоков через несколько полос. Если  $I=20$ , двумерные версии тоже вычисляются ( $J=1$ ). Особая ситуация с  $KAPPA0=0$ , и температура противоположной стены в 1273,15 К вычисляется, чтобы проверить расчет пристеночного теплового потока. Точные значения и расчеты FDS приведены ниже:

$\tau$	$S(\tau)$	FDS (I=20, J=20)		FDS (I=20, J=1)		FDS (I=150)
		1 band	6 bands	1 band	6 bands	1 band
0	148.9709	148.9709	148.4037	147.9426	147.3793	148.9709
0.01	2.8970	2.9180	2.9069	2.8364	2.8256	2.9258
0.1	24.9403	25.5501	25.4529	25.1078	25.0122	25.7045
0.5	82.9457	83.1309	82.8144	84.3719	84.0506	84.0264
1.0	116.2891	115.4051	114.9656	117.801	117.353	116.7751
10.	148.9698	148.9616	148.3947	148.9677	148.4005	148.9695

### 15.3.3 Внутреннее излучение стены (wall\_internal\_radiation)

Лучистый поток внутри стен вычисляется двухпоточной моделью. В этом случае точность двухпоточной модели проверяется при вычислении излучающего потока от однородного слоя материала толщиной 0,10 м при температуре 1273,15 К и температуре окружающей среды 10 К. Коэффициент поглощения изменяется, чтобы охватить диапазон [0.01, 10] оптических глубин.

Точные решения лучистого потока – это аналитические решения излучения плоского слоя [22]

$$S(\tau) = S_b [1 - 2E_3(\tau)] \quad (15.8)$$

где  $S_b = \sigma T^4$  - тепловой поток черного тела от излучающей плоскости, а  $E_3(\tau)$  – экспоненциальная интегральная функция (3-й порядок) оптической глубины  $\tau$ . Точные решения и результаты FDS приведены ниже:

$\tau$	$S(\tau)$ (кВт/м <sup>2</sup> )	FDS (кВт/м <sup>2</sup> )
0.01	2.897	2.950
0.1	24.94	26.98
0.5	82.95	93.90
1.0	116.3	128.4
10.	149.0	149.0

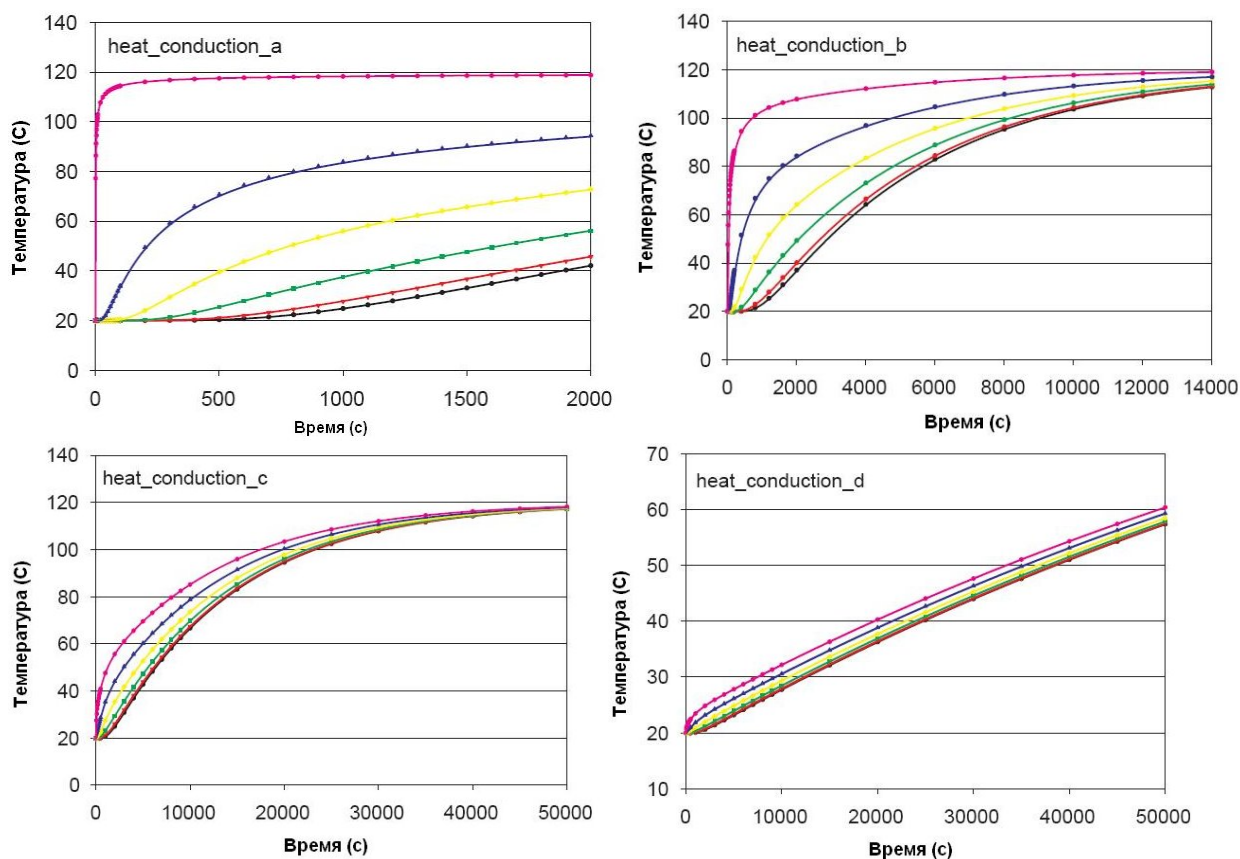
## 15.4 Процессы в твердой фазе

В этом разделе описаны примеры одномерного решателя теплопроводности в FDS вместе с тем, который описывает схему простой двухступенчатой реакции в твердом теле.

### 15.4.1 Простая теплопроводность через твердую пластину (*heat\_conduction*)

Аналитические решения нестационарной одномерной теплопроводности через пластину можно найти в [23] и [24]. Мы проанализировали четыре примера. В каждом из них пластина толщиной 1,0 м с одной стороны соприкасается с воздухом температуры  $T_g=120^\circ\text{C}$ . Другая сторона изолирована (адиабатическая). Конвективная теплопередача от газа к пластине равна  $\dot{q}_c''=h(T_g-T_s)$ , где  $h$  – постоянная,  $T_s$  – температура поверхности пластины. Тепловое излучение не учитывалось.

Пример	$k$ (Вт/м/К)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	$C$ (кДж/кг/К)	$h$ (Вт/м <sup>2</sup> /К)	$Bi$ $gl/k$
A	0.1	100	1	100	100
B	0.1	100	1	10	10
C	1.0	1000	1	10	1
D	10.0	10000	1	10	0.1



### 15.4.2 Температурно-зависимые термические свойства (*heat\_conduction\_kc*)

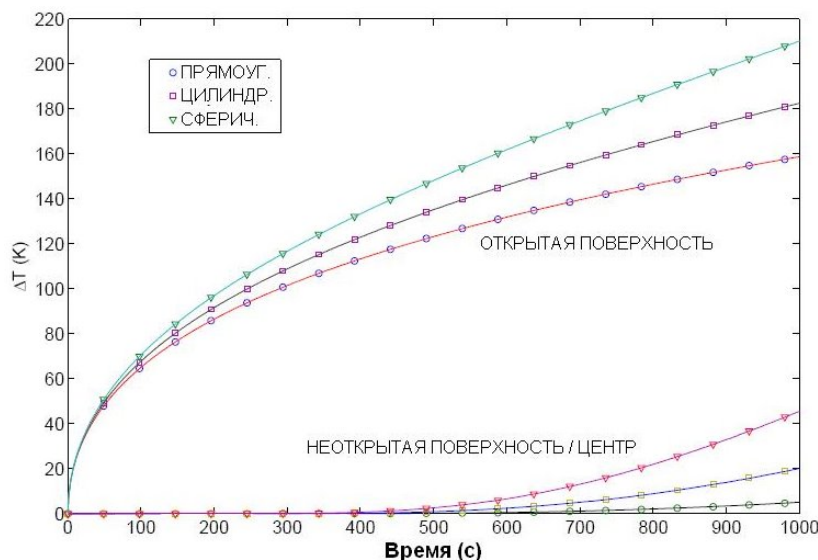
В этом примере демонстрируется одномерная теплопроводность в прямоугольной, цилиндрической и сферической геометриях с температурно-зависимыми термическими свойствами. Справочные результаты вычислялись с помощью HEATING (версия 7.3), многомерной, конечно-разностной модели теплопередачи общего назначения [25]. В прямоугольных и цилиндрических примерах результаты также проверялись на коммерческом конечно-элементном решателе ABAQUS.

Образец однородного материала, первоначально имеющего температуру  $0^{\circ}\text{C}$ , в  $t > 0$  соприкасается с газом температурой  $700^{\circ}\text{C}$ . Допустим, фиксированный коэффициент теплопередачи  $10 \text{ Вт/Км}^2$ . Плотность материала составляет  $10000 \text{ кг/м}^3$ . Проводимость и удельная теплота - функции температуры со следующими значениями:  $k(0)=0.10 \text{ Вт/м/К}$ ,  $k(200)=0.20 \text{ Вт/м/К}$ ,  $c(0)=1.0 \text{ кДж/кг/К}$ ,  $c(100)=1.2 \text{ кДж/кг/К}$ ,  $c(200)=1.0 \text{ кДж/кг/К}$ . Толщина (радиус) образца равна  $0,01 \text{ м}$ . В прямоугольном примере задняя поверхность материала соприкасается с газом температурой  $0^{\circ}\text{C}$ . На рисунке, приведенном ниже, результаты FDS показаны сплошной линией, а результаты HEATING точками. Ввод примера с цилиндрической геометрией выглядит следующим образом:

```
&MATL ID='MAT_1'  
  EMISSIVITY=0.0  
  CONDUCTIVITY_RAMP='K_RAMP'  
  SPECIFIC_HEAT_RAMP='C_RAMP'  
  DENSITY=10000./
```

```
&RAMP ID='K_RAMP' T=0, F=0.10 /  
&RAMP ID='K_RAMP' T=100, F=0.15 /  
&RAMP ID='K_RAMP' T=200, F=0.20 /  
&RAMP ID='C_RAMP' T=0, F=1.00 /  
&RAMP ID='C_RAMP' T=100, F=1.20 /  
&RAMP ID='C_RAMP' T=200, F=1.00 /  
&SURF ID='SLAB'
```

```
  STRETCH_FACTOR=1.0  
  GEOMETRY='CYLINDRICAL'  
  MATL_ID='MAT_1'  
  THICKNESS=0.01/
```



### 15.4.3 Пример простого двухступенчатого пиролиза (*two\_step\_solid\_reaction*)

Рассмотрим совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих массовую долю трех компонентов твердого материала, подвергающегося термическому разложению:

$$\begin{aligned} \frac{dY_a}{dt} &= -K_{ab}Y_a \\ \frac{dY_b}{dt} &= K_{ab}Y_a - K_{bc}Y_b \\ \frac{dY_c}{dt} &= K_{bc}Y_b \end{aligned} \quad (15.9)$$

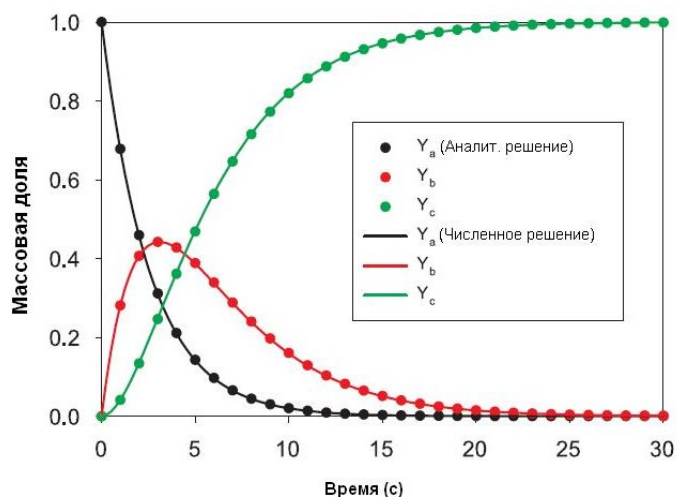
где массовая доля компонента  $a$  изначально равна 1. Аналитическое решение:

$$Y_a(t) = \exp(-K_{ab}t)$$

$$Y_b(t) = \frac{K_{ab}}{K_{bc} - K_{ab}} \exp(-K_{ab}t) - \exp(-K_{bc}t) \quad (15.10)$$

$$Y_c(t) = [K_{ab}(1 - \exp(-K_{bc}t)) + K_{bc} * (\exp(-K_{ab}t) - 1)] / (K_{ab} - K_{bc}) \quad (15.11)$$

Аналитическое и численное решение для параметров  $K_{ab} = 0.389$  и  $K_{bc} = 0.262$  приведено здесь:



## Глава 16

### Проверка кода программы

С целью выявления потенциальных ошибок в численном решении основных уравнений можно использовать проверку структуры компьютерной программы. Кодировка может проверяться третьей стороной либо вручную, либо автоматически при помощи специальных программ для выявления ошибок и несовместимости [14].

В НИСТ FDS была скомпилирована и запускалась на компьютерах следующих компаний-производителей ПК: IBM, Hewlett-Packard, Sun Microsystems, Digital Equipment Corporation, Apple, Silicon Graphics, Dell, Compaq и др. Данные платформы поддерживают следующие операционные системы: Unix, Linux, Microsoft Windows и Mac OSX. Использовались следующие компиляторы: Lahey Fortran, Digital Visual Fortran, Intel Fortran, IBM XL Fortran, HPUX Fortran, Forte Fortran для SunOS, Portland Group Fortran и другие. В зависимости от конфигурации аппаратных средств, операционной системы и компилятора включается немного различный набор опций компилятора и исполняемой программы и точное вычисление исходного кода для его проверки на совместимость со стандартом ISO/ANSI Фортран 90 [26]. При помощи данного процесса обновляется или исключается устаревший и потенциально опасный код, и часто код упрощается для оптимизации на различных машинах. Тем не менее, тот факт, что исходный код FDS можно компилировать и запускать на широкой линейке платформ не гарантирует точности числовых данных. Это лишь начальная точка процесса, так как она исключает вероятность того, что ошибочные или ложные результаты вызваны неверной платформой, на которой запускается код.

Кроме проблем с аппаратными средствами, существует ряд методов проверки исходного кода FDS, разработка которых велась не один год. Одним из наиболее удачных методов является использование симметрии. В FDS используются тысячи строк кода, в которых частные производные в уравнениях сохранения аппроксимируются конечными разностями. Здесь очень просто допустить ошибку. Например, рассмотрим конечно-разностное приближение члена термодиффузии в  $ijk$ -ной ячейке трехмерной сетки:

$$\begin{aligned}(\nabla \cdot k \nabla T)_{ijk} \approx & \frac{1}{\delta x} \left[ k_{i+\frac{1}{2},jk} \frac{T_{i+1,jk} - T_{ijk}}{\delta x} - k_{i-\frac{1}{2},jk} \frac{T_{ijk} - T_{i-1,jk}}{\delta x} \right] + \\ & \frac{1}{\delta y} \left[ k_{i,j+\frac{1}{2},k} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{ijk}}{\delta y} - k_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{T_{ijk} - T_{i,j-1,k}}{\delta y} \right] + \\ & \frac{1}{\delta z} \left[ k_{ij,k+\frac{1}{2}} \frac{T_{ij,k+1} - T_{ijk}}{\delta z} - k_{ij,k-\frac{1}{2}} \frac{T_{ijk} - T_{ij,k-1}}{\delta z} \right]\end{aligned}$$

На языке исходного кода Фортран это записывается следующим образом:

```
DTDX = (TMP(I+1,J,K)-TMP(I,J,K))*RDXN(I)
KDTDX(I,J,K) = .5*(KP(I+1,J,K)+KP(I,J,K))*DTDX
DTDY = (TMP(I,J+1,K)-TMP(I,J,K))*RDYN(J)
KDTDY(I,J,K) = .5*(KP(I,J+1,K)+KP(I,J,K))*DTDY
DTDZ = (TMP(I,J,K+1)-TMP(I,J,K))*RDZN(K)
KDTDZ(I,J,K) = .5*(KP(I,J,K+1)+KP(I,J,K))*DTDZ
```

$$\begin{aligned} \text{DELKDEL} = & (\text{KDTDX}(I,J,K) - \text{KDTDX}(I-1,J,K)) * \text{RDX}(I) + \\ & (\text{KDTDY}(I,J,K) - \text{KDTDY}(I,J-1,K)) * \text{RDY}(J) + \\ & (\text{KDTDZ}(I,J,K) - \text{KDTDZ}(I,J,K-1)) * \text{RDZ}(K) \end{aligned}$$

Это один из простых структурных элементов, так как модель, появляющаяся при помощи строк кода позволяет легко это проверить. Однако ошибка в написании I или J, или знака «плюс» или «минус», или любая из сотни различных ошибок может привести к сбою кода или что еще хуже – к ошибочному результату. Несложным способом исключения большинства подобных ошибок является запуск простых сценариев с идеально симметричными исходными и граничными условиями. Например, поместите горячий куб точно в центр большего холодного помещения, отключите силу тяжести и наблюдайте за распространением тепла с горячего куба в холодный газ. Любая простая ошибка в кодировке уравнения сохранения энергии проявится практически сразу. Затем включите силу тяжести и при отсутствии ошибок кодировки, с поверхности горячего куба поднимется идеально симметричный столб дыма. При этом проверяется как кодировка энергии, так и уравнения количества движения. Аналогичные проверки подходят для всех трехмерных программ конечных разностей. Данные методы проверок являются всесторонними, поэтому программа рабочей версии FDS создает минимальное количество белого шума в начальном поле потока с целью исключения любых ошибочных симметрий, которые могут возникнуть в численном решении.

Добавление новых функций в FDS происходит следующим образом: обычно программу пишет один человек (необязательно сотрудник НИСТ), который берет последнюю версию исходного кода, добавляет новую функцию и пишет теоретическое и численное описание для «Технического Руководства FDS», плюс описание входных параметров для «Руководства пользователя FDS». Затем новая версия FDS тестируется в НИСТ при помощи ряда сценариев эталонных тестов, которые используют ряд новых параметров. Предварительное одобрение новой программы зависит от следующих факторов: (1) повышения точности результатов работы программы по сравнению с опытными измерениями, (2) верности теоретического описания, и (3) доступности любых эмпирических параметров в открытой литературе или стандартном лабораторном оборудовании. Если новая функция принята, ее добавляют в испытательную версию программного обеспечения и оценивают независимые пользователи и/или лицензиаты НИСТ, чьи исследования касаются данной темы. Если неустраняемые проблемы, появляющиеся в ходе тестирования отсутствуют, новая программа в итоге становится частью рабочей версии FDS.

Даже после всех проверок кода программы, проводимых НИСТ, существует вероятность ошибок. Одним из методов устранения таких ошибок может быть открытость исходного кода FDS. Несмотря на то, что код состоит из порядка 10,000 строк операторов Фортран, разные ученые за пределами НИСТ могут использовать код, совершенствовать его для более специфичных приложений или для научных целей, и сообщать разработчикам программы о выявленных ошибках. Исходный код систематизирован в 14 отдельных файлов, в каждом из которых представлена подпрограмма, отвечающая за определенную функцию модели, такую как уравнения сохранения массы, импульса и энергии, включение спринклера и распылителей, решатель давления и т.д. Наиболее длинными программами представлены входные, выходные данные и инициализация. Большинство программ, работающих с исходным кодом, не представлены такими длинными программами, так как они сфокусированы на методе конечных разностей, который находится в нескольких более важных файлах. В данных файлах и встречаются наиболее серьезные ошибки, так как в них находится ядро метода. Сторонние ученые обеспечивают обратную связь относительно организации кода и его внутренней документации, то есть комментарии по самому

исходному коду. К тому же они должны компилировать код на собственных компьютерах, что также обеспечивает портативность программы. Во втором томе приведен ряд работ выполненных учеными, которые усовершенствовали код программы. Однако большинство сообщений об ошибках программы приходят по электронной почте и не документируются. Большинство сообщений о текущих ошибках относятся к программам, которые разработчики FDS используют редко. Например, открывание дверей помещения или разбивание окон, в особенности при активации теплового пожарного извещателя – это функция FDS, часто используемая в сфере противопожарного проектирования, а не самим НИИСТ. В результате чего за годы пользователи составили множество сообщений с описанием сложных последовательностей событий, которые не вошли в саму программу. Ошибки несложно исправить, но полной проверке на наличие ошибок препятствует количество возможных изменений этих событий. Другую проблему, о которой сообщили пользователи, представляют сценарии, требующие добавления ряда параметров, которые изначально не были предусмотрены в модели. К ним относятся стены из пенопласта, возгорания в холодильниках, утечки газа, и др., но это лишь часть из того, что пользователи не смогли смоделировать, так как такие параметры модели или никогда не использовались (например, слишком низкие коэффициенты теплопроводности), или эти параметры недопустимы (например, температура ниже температуры окружающей среды). Данные сообщения пользователей помогают усовершенствовать и расширять возможности использования модели.



## Глава 17

### Численные тесты

#### 17.1 Предпосылки

Численные методы, используемые при решении основных уравнений модели, также могут являться источником ошибок. В FDS используется гидродинамическая модель второго порядка точности по координатам и времени. Это означает, что ошибочные члены, связанные с приближением пространственных частных производных к конечным разностям порядка квадрата размера одной ячейки сетки, и, таким образом, ошибка приближения временных производных порядка квадрата временного шага. При уточнении численной сетки уменьшается «ошибка дискретизации», и повышается точность визуализации распределения потока. Особенно важен вопрос чувствительности сетки для надлежащего использования модели. Данный вопрос рассматривается в следующей главе.

Общепринятым методом проверки решений потоков является систематическое уточнение численной сетки до тех пор, пока не изменится найденное решение, именно этот момент в вычислении и называется «прямое численное решение» (DNS) основных уравнений. В большинстве сценариев реального пожара вычисление DNS невозможно осуществить на обычных компьютерах. Однако в FDS есть функция запуска в режиме DNS, при которой уравнения Навье-Стокса решаются без использования моделей турбулентности подсеточного масштаба. Так как базовый численный метод одинаков для LES и DNS, вычисления DNS представляют собой эффективный способ проверки основного решателя, в частности, если это решение для установившегося состояния. В ходе разработки программа FDS использовалась в режиме DNS для специальных приложений. Например, FDS (или ее основные алгоритмы) использовались на сетках с разрешением 1 мм для моделирования пламени, распространяющемся по бумаге в среде микрогравитации [27, 28, 29, 30, 31, 32], а также для моделирования эффектов «g-флуктуаций» в космических кораблях [33]. Результаты моделирования сравнивали с экспериментами, проводимыми на борту космического корабля США «Шаттл». Пламя имело ламинарную и относительно простую структуру, сопоставления представляли собой качественную оценку решения модели. Аналогичные исследования проводились по сопоставлению расчетов DNS простого пламени горелки с результатами лабораторных экспериментов [34]. В другом исследовании сравнивались расчеты FDS встречного диффузионного горения с экспериментальными измерениями и результатами одномерной многоступенчатой кинетической модели [35].

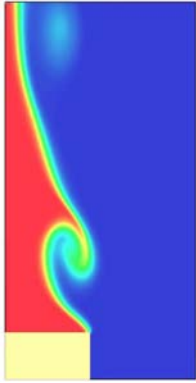
На ранних стадиях работы с гидродинамическим решателем сравнивались двухмерные расчеты гравитационных течений с морскими экспериментами [36]. В этих тестах численная сетка систематически уточнялась до полного совпадения с результатами экспериментов. При наличии существенных дефектов в гидродинамическом решателе такое точное совпадение было бы невозможно.

#### 17.2 Гидродинамика

Аналитических решений полностью турбулентных уравнений Навье-Стокса не существует, но можно смоделировать хорошо известные потоки жидкости, чтобы определить, работает ли в FDS решающая программа основного потока жидкости как надо.

### 17.2.1 Осесимметричный шлейф из гелия (*helium\_2d*)

Решенные основные уравнения в FDS задаются в показателях трехмерной прямоугольной системы координат. Но двумерные прямоугольные или двумерные цилиндрические (осесимметричные) вычисления можно выполнить, задав количество ячеек в направлении у равным единице. Пример осесимметричного гелиевого шлейфа приведен здесь вместе со входным файлом:



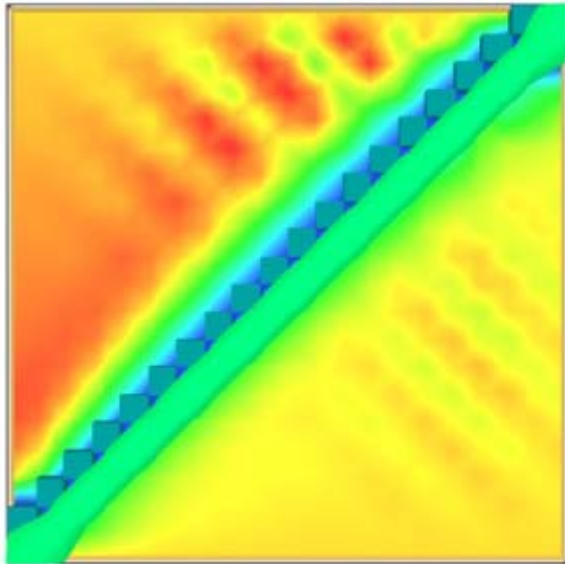
```
&HEAD CHID='helium_2d',TITLE='Axisymmetric Helium Plume' /
&MESH IJK=72,1,144 XB=0.00,0.08,-0.001,0.001,0.00,0.16, CYLINDRICAL=.TRUE. /
&TIME TWFIN=5.0 /
&MISC DNS=.TRUE., ISOTHERMAL=.TRUE. /
&SPEC ID='HELIUM' /
&SURF ID='HELIUM',VEL=-0.673, MASS FRACTION(1)=1.0, TAU MF(1)=0.3 /
&VENT MB='XMAX',SURF ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX',SURF ID='OPEN' /
&OBST XB= 0.0,0.036,-0.001,0.001,0.00,0.02, SURF_IDS='HELIUM','INERT','INERT' /
&DUMP PLOT3D QUANTITY(1)='PRESSURE',PLOT3D QUANTITY(5)='HELIUM' /
&SLCF PBY=0.000,QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.000,QUANTITY='HELIUM' /
&TAIL /
```

### 17.2.2 Зубчатость (*sawtooth*)

Для изображения изогнутых или наклонных объектов приходится использовать препятствия, составленные из отдельных прямоугольников - зубчатые. Проблема в том, что они могут изменить структуру потока около стены. Чтобы снизить влияние зубчатых границ, можно установить опцию `SAWTOOTH=.FALSE.` Если `SAWTOOTH` переключено на `FALSE`, граничные условия скорости будут применяться таким образом, чтобы снизить зависимость от границ вихрями на острых углах, как показано в следующем примере:

```
&OBST XB= 0.00, 0.05,-0.01, 0.01, 0.00, 0.05, SAWTOOTH=.FALSE., COLOR='EMERALD GREEN' /
&OBST XB= 0.05, 0.10,-0.01, 0.01, 0.00, 0.10, SAWTOOTH=.FALSE., COLOR='EMERALD GREEN' /
&OBST XB= 0.10, 0.15,-0.01, 0.01, 0.05, 0.15, SAWTOOTH=.FALSE., COLOR='EMERALD GREEN' /
&OBST XB= 0.15, 0.20,-0.01, 0.01, 0.10, 0.20, SAWTOOTH=.FALSE., COLOR='EMERALD GREEN' /
```

На рисунке ниже для верхних препятствий `SAWTOOTH=.TRUE.`, а для нижних `SAWTOOTH=.FALSE.` Прилежащие препятствия, для которых `SAWTOOTH=.FALSE.`, изображаются в Smokeview как одно гладкое препятствие зеленого цвета. Заметьте, воздух движется вдоль этих препятствий, и скорость воздуха у нижних препятствий не так зависит от вихрей.



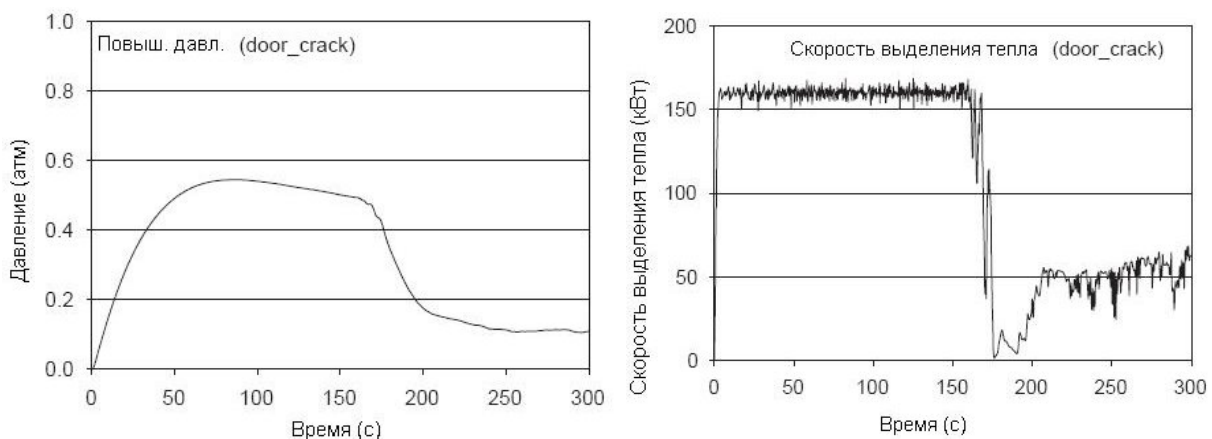
## 17.3 Горение

### 17.3.1 Огонь в простом плохо проветриваемом пожарном отсеке (door\_crack)

В этом примере описывается такой же простой пожарный отсек, который в предыдущем разделе использовался для проверки кривых утечки и вентилятора. Теперь мы добавим небольшой огонь (160 кВт) с тем же самым вентилятором и щелью для утечки под дверью. Пожарный отсек теперь открывается в атмосферу, а не в герметичное заполненное пространство. Ожидается резкое повышение давления в пожарном отсеке из-за огня и вентилятора. В начале повышение давления примерно такое:

$$\frac{d\bar{p}_1}{dt} \approx (\gamma - 1) \frac{\dot{Q}}{V} + \gamma \bar{p} \frac{\dot{V}}{V} \approx 3200 \text{ Pa/s} \approx 0.03 \text{ atm/s} \quad (17.1)$$

где  $\gamma \approx 1,4$ ,  $\dot{Q} = 160,000 \text{ Вт}$ ,  $V = 20.7 \text{ м}^3$  и  $\dot{V} = 0.016 \text{ м}^3/\text{с}$ . Примерно за 150 с давление возрастает приблизительно на 0,6 атм, и огонь гаснет из-за отсутствия кислорода. Потом давление падает, и вентилятор снова запускается (он остановился из-за высокого давления в пожарном отсеке). Вентилятор и утечка под дверью повышают концентрацию кислорода, по крайней мере, около этих отверстий, и насыщенные топливом пары в пожарном отсеке продолжают гореть.



Ввиду того, что этот пример демонстрирует несколько интересных физических явлений и *проверяет* некоторые функции FDS, очень важно отметить следующее:

- Несмотря на то, что видно, как дым выходит обратно из вентилятора, в реальности его было бы больше. Большинство условно построенных конструкций не выдержат избыточное давление в 0,6 атм без какой-либо разгрузки. Вентилятор и щель под дверью подчиняются простым формулам, основанным на разнице в давлении, но у этого допущения есть ограничения.
- Вероятнее всего, огонь в этой ситуации на самом деле исчез бы сам, когда объемная доля кислорода стала бы ниже примерно 15%. Но его повторное появление у щели под дверью и канала вентилятора зависело бы от наличия искры или любого очага огня. В FDS поток топлива продолжает поступать в пожарный отсек после местного затухания, но пожарный отсек охлаждается. Алгоритм горения в FDS предполагает, что в каждой ячейке сетки есть «виртуальная свеча зажигания», которая инициирует возгорание, если местное соотношение топлива и кислорода достаточное.

### 17.3.2 Проверка функции «выгорание» (*box\_burn\_away*)

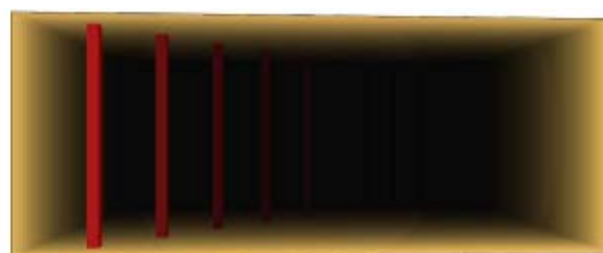
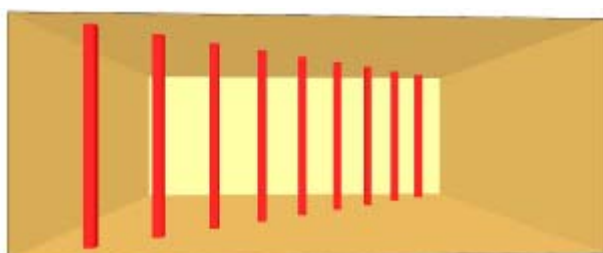
Это примитивный пример твердого блока «пеноматериала», который загорается и горит, пока полностью не исчезнет. Свойства блока пеноматериала были подобраны только для того, чтобы обеспечить быстрый расчет. Цель расчета – убедиться, что интегрированная скорость выделения тепла соответствует свойствам материала блока. Сторона блока 0,4 м, плотность 20 кг/м<sup>3</sup>. Его теплота сгорания равна 20000 КДж/кг. Зажигатель представляет собой горелку в 10 кВт, помещенную за блоком. Интегрированная скорость выделения тепла для расчета на 120 с должна быть:

$$(0.4)^3 \text{ m}^3 \times 20 \text{ kg/m}^3 \times 20000 \text{ kJ/kg} + 10 \text{ kW} \times 120 \text{ s} = 26.8 \text{ MJ} \quad (17.2)$$

## 17.4 Датчики

### 17.4.1 Лучевой датчик (*beam\_detector*)

Пожарный отсек 10 м х 10 м х 4 м заполнен MIXTURE\_FRACTION\_2 0,006 кг/кг с образованием сажи 0,01 кг/кг по умолчанию. Это приводит к начальной плотности сажи 71,9 мг/м<sup>3</sup>, которая дает оптическую глубину 0,626 м<sup>-1</sup> с коэффициентом затухания по умолчанию 8700 м<sup>2</sup>/кг. Пожарный отсек имеет ряд препятствий, расположенных на разной глубине на расстоянии 1 м друг от друга. На основе соотношения visibility (видимости) выходной величины мы получаем расстояние видимости в 4,8 м. При обзоре слоев дыма в Smokeview пятое препятствие, находящееся на расстоянии 5 м, едва видно. Следовательно, Smokeview достоверно отображает затемнение начальной плотности сажи. В пожарном отсеке также находятся три оптических приемника лучей. У всех трех длина пути составляет 10 м, но они направлены в разные стороны отсека. Учитывая, что оптическая глубина 0,626 м<sup>-1</sup>, длина пути 10 м, ожидаемое суммарное затемнение 99,81%, что совпадает с результатом, подсчитанным FDS для каждого из датчиков.



### 17.4.2 Датчик аспирации (*aspiration\_detector*)

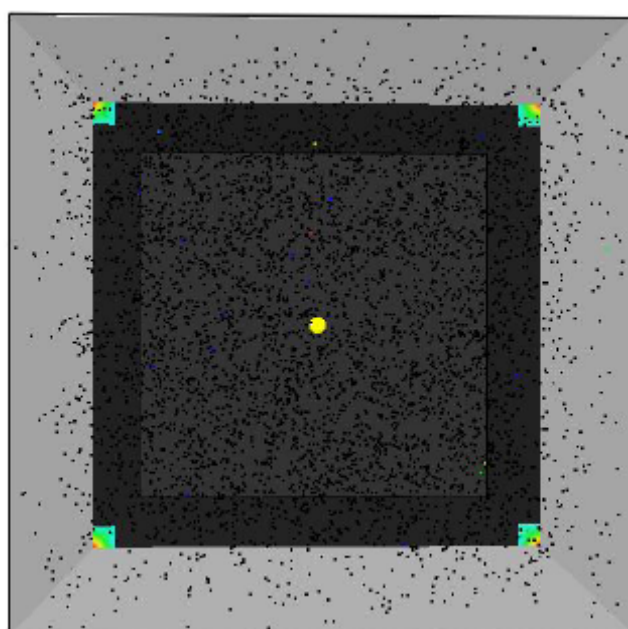
Кубический пожарный отсек со стороной 2 м и огнем внутри имеет три системы аспирации для анализа области. В трех областях скорость потока 0,1, 0,5 и 0,8 кг/с соответственно. Скорость течения по обводному каналу указана для датчика аспирации. Входной файл фиксирует начальный шаг по времени на 0,01 с, так что начальное время выхода в файле **aspiration\_detector\_devc.csv** будет точно равняться времени переноса. В 0,75 с, когда FDS начинает уменьшать шаг по времени ниже 0,01 с, плотность сажи с выдержкой времени в трех рассматриваемых областях составила  $7.4 \times 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>,  $9.5 \times 10^{-4}$ /м<sup>3</sup>, и  $1.6 \times 10^{-18}$  кг/м<sup>3</sup> соответственно. Эти значения вместе с соответствующей скоростью потока дают затемнение датчика 0,000823% /м, что совпадает с расчетами FDS.

## 17.5 Капли и мелкие брызги

В этом разделе рассматриваются примеры, включая испаряющиеся капли как воды, так и топлива.

### 17.5.1 Испарение капли воды (*water\_evaporation*)

Этот пример, названный **water\_evaporation**, не более чем неизменяющиеся капли воды в адиабатической коробке с размером стороны 1 м. Воздух внутри коробки циркулирует для поддержания одинаковых условий, утечки и теплопотери отсутствуют. Начальная температура воздуха 40°C. Изначально средний объемный диаметр капель 100 мк, температура 90°C, а общая масса 0,02 кг. Ожидается, что устойчивое состояние будет достигнуто через несколько минут. Начальная энергоемкость коробки, сумма энтальпий воздуха и воды, 360000 кДж. После непродолжительного периода времени 0,0141 кг воды испаряется, коробка достигает равновесной температуры 16,2°C, см. рис. ниже. В этот момент энергоемкость коробки равна 372000 кДж, т.е. ошибка составляет 3%. При 16,2°C предполагаемое испарение составляет 0,0142 кг.



Slice temp C	Part temp C
17.0	17.0
16.9	16.9
16.8	16.8
16.7	16.7
16.6	16.6
16.5	16.5
16.4	16.4
16.3	16.3
16.2	16.2
16.1	16.1
16.0	16.0

### 17.5.2 Измерение потока воды (*bucket\_test*)

Распространенный способ измерения распределения брызг от спринклера называется «ковшовый тест». Обычно один или несколько спринклеров устанавливаются на указанном расстоянии от расположенных в определенном порядке водосборников, вода течет на протяжении заданного периода времени, и распределение потока воды подсчитывается в каждом ковше. В проверочной ситуации **bucket\_test** один спринклер установлен на расстоянии 10 см под 5-метровым потолком. Вода течет 5 секунд с постоянной скоростью 60 л/мин. Расчет продолжается следующие 5 секунд, чтобы позволить водяным каплям достичь пола. Общая масса вылившейся воды равна:

$$60 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times \frac{1}{60} \frac{\text{min}}{\text{s}} \times 5 \text{ s} = 5 \text{ kg} \quad (17.3)$$

В расчете граничная величина `water_drops_AMPUA` (Accumulated Mass Per Unit Area/накопленная масса на единицу площади) записывает общую массу воды на единицу площади ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ), аналогично тому, как реальные ковши передают размер ячейки. Сумма значений `water_drops_AMPUA` по всему полу дает 4.96 кг. Где же недостающая вода? Некоторые капли испаряются, а некоторые вылетают за пределы домена. Также на конец вычислений в воздухе остается небольшое количество капель. Не забудьте, что в расчете нет реальных «ковшей».

Масса накопленной воды на полу извлекается из граничного файла (BNDF) с помощью программы **fds2ascii**. Ниже приведена запись сессии, с помощью которой двоичный выходной файл FDS преобразуется в формат ASCII:

```
>> fds2ascii
Enter Job ID string (CHID): bucket_test
What type of file to parse?
PL3D file? Enter 1
SLCF file? Enter 2
BNDF file? Enter 3
3
Enter Sampling Factor for Data?
(1 for all data, 2 for every other point, etc.)
1
Limit the domain size? (y or n)
y
Enter min/max x, y and z
-5 5 -5 5 0 1
1 MESH 1, water_drops_AMPUA
Enter starting and ending time for averaging (s)
9 10
Enter orientation: (plus or minus 1, 2 or 3)
3
Enter number of variables 1
Enter boundary file index for variable 1
1
Enter output file name: bucket_test_fds2ascii.csv
Writing to file... bucket_test_fds2ascii.csv
```

### 17.5.3 Схема комплексного разбрызгивания (*bucket\_test\_2*)

Ситуацию из предыдущего раздела изменили так, чтобы получилось две струи воды.

```
&PROP ID='K-11', QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE', OFFSET=0.10,  
PART_ID='water_drops', FLOW_RATE=60., SPRAY_PATTERN_TABLE='TABLE1',  
SMOKEVIEW_ID='sprinkler_upright' /
```

```
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=30,31,0,1,5,0.2/
```

```
&TABL ID='TABLE1', TABLE_DATA=30,31,179,180,5,0.8/
```

Струи разведены на 180°C. Струя в отрицательном направлении по x имеет одну четвертую скорости потока струи в положительном направлении x.

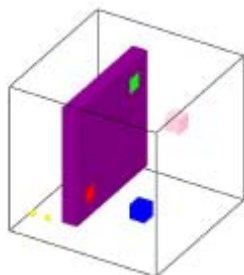
При отображении частиц в Smokeview видны две разные струи капель, направленные в противоположных направлениях. Следуя вышеприведенным инструкциям постобработки, можете видеть, что у струи +x действительно четырехкратный поток струи -x.

## 17.6 Общая функциональность

В этом разделе описаны разные простые способы проверки функциональности кода. Эти примеры хорошо показывают, как можно что-то осуществить в FDS.

### 17.6.1 Создание и удаление *HOLE* (отверстий) и *OBST* (препятствий) (*create\_remove*)

Часто удобно создать или удалить твердое препятствие или, наоборот, удалить или создать пустые отверстия. По существу это одно и то же, поскольку в FDS действует взаимосвязанная логика, но вот ввод данных может быть проблематичным. Во избежание путаницы ниже приведен пример отверстий и препятствий, которые нужно создать и удалить.



```
&HOLE XB=0.25,0.45,0.20,0.30,0.20,0.30, COLOR='RED', DEVC_ID='timer 1' /  
&HOLE XB=0.25,0.45,0.70,0.80,0.70,0.80, COLOR='GREEN', DEVC_ID='timer 2' /
```

```
&OBST XB=0.70,0.80,0.20,0.30,0.20,0.30, COLOR='BLUE', DEVC_ID='timer 3' /  
&OBST XB=0.70,0.80,0.60,0.70,0.60,0.70, COLOR='PINK', DEVC_ID='timer 4' /
```

```
&DEVC XYZ=0.1,0.1,0.1, ID='timer1', SETPOINT= 1.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /  
&DEVC XYZ=0.2,0.1,0.1, ID='timer2', SETPOINT= 2.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.TRUE. /  
&DEVC XYZ=0.1,0.1,0.1, ID='timer 3', SETPOINT= 3.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /  
&DEVC XYZ=0.2,0.1,0.1, ID='timer4', SETPOINT= 4.0, QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.TRUE. /
```

## Глава 18

### Материалы

#### 18.1 Проверка свойств твердой фазы

Реальные горючие материалы могут быть очень сложными. Несомненно, строки SURF и MATL во входном файле будут состоять из сочетания эмпирических и фундаментальных свойств, которые часто происходят из разных источников. Откуда вы можете знать, что значения разных свойств и соответствующий термодинамический расчет в FDS являются правдивым описанием твердого тела? В крупномасштабном расчете трудно устранить неточности, связанные с функциями газовой и твердой фаз. Но все же, легко выполнить простую проверку поверхностных свойств, главным образом, отключив газовую фазу - без горения и конвективной теплопередачи. Существует несколько параметров, разбросанных по разным группам, позволяющих это сделать.

1. Создайте заведомо грубую сетку, просто чтобы FDS запустилась. Поскольку расчет газообразной фазы отключен, вам нужно всего 4 ячейки в каждом направлении (IJK=4,4,4) для решателя давления, чтобы не было ошибок.
2. В строке TIME задайте WALL\_INCREMENT=1, чтобы FDS обновляла твердую фазу каждый шаг по времени (обычно она это делает каждый второй шаг по времени), и задайте для DT любое значение, которое подходит для расчета твердой фазы. Так как нет расчета газовой фазы, который бы ограничивал шаг по времени, лучше всего контролировать его самостоятельно.
3. Вставьте H\_FIXED=0 в строку MISC. Так отключается конвективный теплопоток от газа к поверхности и наоборот. Теплопоток к твердому телу задается EXTERNAL\_FLUX (кВт/м<sup>2</sup>) в строке SURF, которая относится к твердой поверхности. Если вы хотите задать конкретный конвективный теплопоток к твердой поверхности, указать ASSUMED\_GAS\_TEMPERATURE в строке MISC вместе с ненулевым значением H\_FIXED.
4. Отключите все вычисления газообразной фазы, указав SOLID\_PHASE\_ONLY=.TRUE. в строке MISC. Это также значительно ускорит расчет. Если нужно рассчитать газообразную фазу, можно отключить горение, вписав строку REAC с единственным Y\_O2\_INFTY=0.01. Таким образом, массовая доля кислорода в окружающей среде задается 0,01, чего недостаточно для поддержания хоть какого-то горения.
5. Создайте строки MATL плюс одну строку SURF как обычно, но не добавляйте EXTERNAL\_FLUX в строке SURF. Это просто «виртуальный» источник, подогревающий твердое тело. Воспринимайте его как идеальную излучающую панель или конусный калориметр.
6. Привяжите SURF\_ID в VENT, который охватывает низ вычислительного домена. Создайте OPEN (открытые) вентиляционные отверстия на всех других сторонах.
7. Наконец, к твердой поверхности добавьте устройства выхода данных по твердой фазе, например, WALL\_TEMPERATURE, HEAT\_FLUX, BURNING\_RATE, GAUGE\_HEAT\_FLUX и WALL\_THICKNESS (предполагая, что тело должно выгореть). Используйте это для отслеживания состояния твердого тела как функцию



времени. В частности, убедитесь, что `BURNING_RATE` соответствует приложенному внешнему теплотокну. Также проверьте `WALL_TEMPERATURE`. Сравните ваши результаты с показаниями лабораторных приборов, например, конусного калориметра. Но не забывайте, что расчеты и экспериментальные данные не всегда полностью совпадают. Расчет предназначен для устранения неточностей, связанных с конвекцией, горением и аппаратно-обусловленными процессами.

## 18.2 Термопластик

Термин «термопластик» часто относится к материалам, которые в значительной степени нагреваются и превращаются в газ без твердого остатка. Здесь термин применяется только для обозначения материалов, для которых пиролиз может быть рассчитан с одной реакцией, при которой твердое тело превращается в газообразное топливо.

### 18.2.1 Простой термопластик (*thermoplastic*)

Цель этого примера – показать, как в FDS работает расчет пиролиза твердой фазы. Чаще всего расчет газообразной фазы не отключается только при задании «виртуального» теплотокна в  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Твердое тело в этом примере представляет собой пластиковую пластину, по составу сходную с ПММА. Твердое тело описано следующей строкой SURF:

```
&SURF ID='PMMA SLAB'  
  COLOR='BLACK'  
  MATL_ID='PMMA'  
  THICKNESS=0.025  
  EXTERNAL_FLUX=50. /
```

Внешний поток задействован только для этого простого демонстрационного примера.

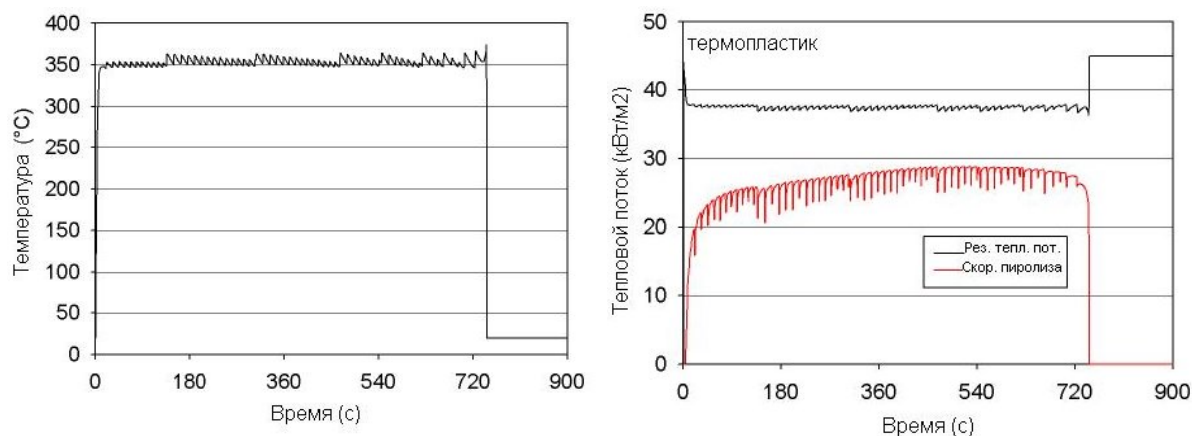
COLOR имеет значение только для распознавания его в Smokeview. EXTERNAL\_FLUX – виртуальный источник тепла, который используется только для этого типа тестов. Свойства материала передаются строкой MATL:

```
&MATL ID='PMMA'  
  CONDUCTIVITY=0.25  
  SPECIFIC_HEAT=1.0  
  DENSITY=500.  
  N_REACTIONS=1  
  NU_FUEL=1.  
  HEAT_OF_REACTION=1578.  
  HEAT_OF_COMBUSTION=25200.  
  REFERENCE_TEMPERATURE=330./
```

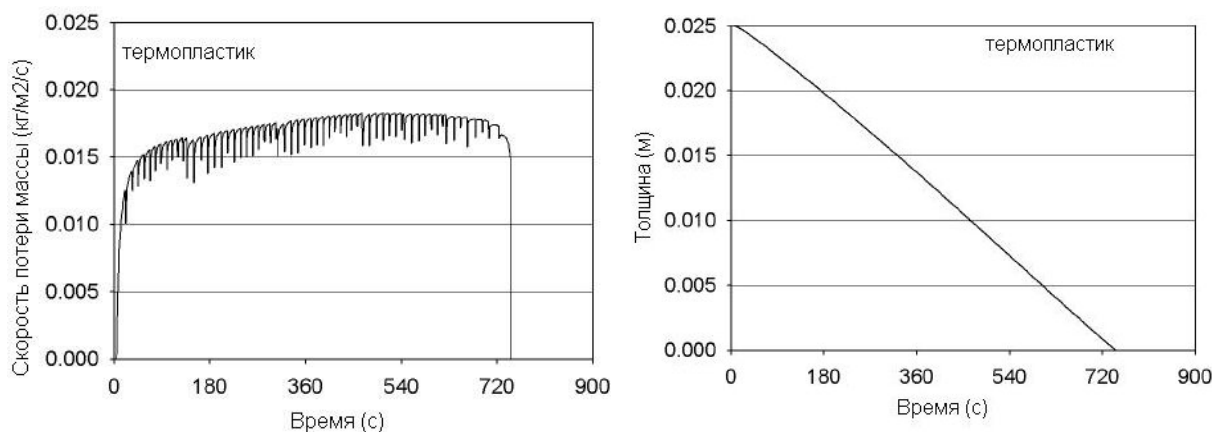
Отметьте, что помимо  $k$ ,  $\rho$  и  $c$  указывается одна реакция, продуктом которой является 100% топливный газ ( $NU\_FUEL=1$ ). Фазовое превращение из твердого состояния в газообразное расходует энергию в размере  $1,578 \text{ кДж/кг}$ . Для данного примера это не имеет значения, но сжигание этих газов даст энергии в объеме  $25,200 \text{ кДж/кг}$ . Номинально реакция протекает при  $330^\circ\text{C}$ , а необходимый параметр для расчета пиролиза приведен в разделе 8.4.2.

На графиках внизу изображены температура поверхности и теплотокн как функция времени. Обратите внимание, что коэффициент поглощения поверхности материала равен  $0.9$ , то есть только  $45 \text{ кВт/м}^2$  из начальных  $50 \text{ кВт/м}^2$  действительно нагревают тело. Часть этой энергии нагревает тело примерно до  $350^\circ\text{C}$  на поверхности, часть излучается мимо

(около  $8 \text{ кВт/м}^2$ ), часть превращает твердый материал в газ, и здесь изображена на графике как произведение скорости горения и теплоты реакции.



Пластина толщиной  $0,025 \text{ м}$  и плотностью  $500 \text{ кг/м}^3$ . Это означает, что присутствует  $12,5 \text{ кг/м}^2$  топлива, которые, если поделить на скорость горения (примерно  $0,018 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ ) дает время горения около  $700 \text{ с}$ . После чего материал «выгорает».



### 18.2.2 Обугливающееся твердое тело (charring\_solid)

В этом примере просто воспроизводится алгоритм твердой фазы в FDS. Обычно газообразная фаза выключена кроме случаев приложения «виртуального» теплового потока в  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Механизм реакции довольно сложен из-за присутствия твердых веществ, например, целлюлозы, угля и пепла. Каждый вводится строкой MATL следующим образом:

```
&SURF    ID='SPRUCE'
          STRETCH_FACTOR = 1.
          CELL_SIZE_FACTOR = 0.5
          MATL_ID(1,1:3)='CELLULOSE','WATER','LIGNIN'
          MATL_MASS_FRACTION(1,1:3) = 0.70,0.1,0.20
          MATL_ID(2,1) = 'CASI'
          THICKNESS(1:2) = 0.01,0.01
          EXTERNAL_FLUX = 50. /
```

```
&MATL    ID = 'CELLULOSE'
          CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_cell'
          SPECIFIC_HEAT = 2.3
          DENSITY = 400.
```

N\_REACTIONS = 1  
A = 2.8E19  
E = 2.424E5  
HEAT\_OF\_REACTION = 0.  
NU\_RESIDUE = 1.0  
RESIDUE = 'ACTIVE' /

&MATL ID = 'ACTIVE'  
EMISSIVITY = 1.0  
CONDUCTIVITY\_RAMP = 'k\_cell'  
SPECIFIC\_HEAT = 2.3 DENSITY = 400.  
N\_REACTIONS = 2  
A(1:2) = 1.3E10, 3.23E14  
E(1:2) = 1.505E5, 1.965E5  
HEAT\_OF\_REACTION(1:2) = 418., 418.  
NU\_RESIDUE(1:2) = 0.35, 0.0  
NU\_FUEL(1:2) = 0.65, 1.0  
RESIDUE(1) = 'CHAR' /

&MATL ID = 'WATER'  
EMISSIVITY = 1.0  
DENSITY = 1000.  
CONDUCTIVITY = 0.6  
SPECIFIC\_HEAT = 4.19  
N\_REACTIONS = 1  
A = 1E20  
E = 1.62E+05  
NU\_WATER = 1.0  
HEAT\_OF\_REACTION = 2260. /

&MATL ID = 'CASI'  
CONDUCTIVITY\_RAMP = 'k\_CASI'  
DENSITY = 200.  
SPECIFIC\_HEAT = 1.0 /

&MATL ID = 'LIGNIN'  
EMISSIVITY = 1.0  
DENSITY = 550.  
CONDUCTIVITY = 0.1  
SPECIFIC\_HEAT = 1.1 /

&MATL ID = 'CHAR'  
EMISSIVITY = 1.0  
DENSITY = 140.  
CONDUCTIVITY\_RAMP = 'k\_char'  
SPECIFIC\_HEAT = 1.1 /

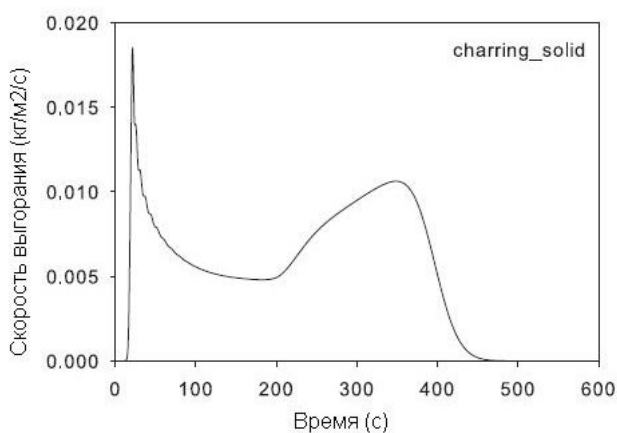
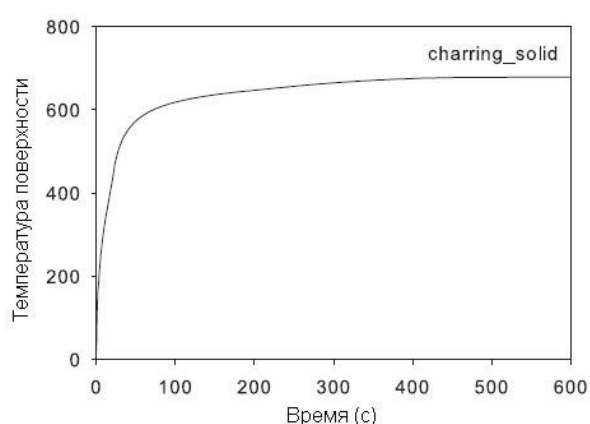
&RAMP ID='k\_cell', T= 20., F=0.15 /  
&RAMP ID='k\_cell', T=500., F=0.29 /

&RAMP ID='k\_char', T= 20., F=0.08 /  
&RAMP ID='k\_char', T=900., F=0.25 /

&RAMP ID='k\_CASI', T= 20., F=0.06 /  
&RAMP ID='k\_CASI', T=400., F=0.25 /

Обратите внимание на вариант параметра EXTERNAL\_FLUX в строке SURF. Он создает поток в  $50 \text{ кВт/м}^2$  в образце безо всяких дополнительных входных строк в файле. Он нужен только для проверки расчета твердой фазы, и его не нужно копировать в требуемый расчет пожара.

Цифры внизу отображают температуру поверхности и скорость горения дерева под внешним тепловым потоком в  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Скорость горения достигает максимума в начале расчета, снижается на протяжении фазы горения, а затем в конце снова достигает максимума благодаря наличию внешнего материала. Начальное максимальное значение типично для обугливающихся твердых тел.



## Глава 19

### Примеры пожаров

#### 19.1 Предпосылки

Все расчеты огня должны включать «модель» самого огня. Почти всегда эти модели являются упрощенным представлением реального горящего объекта. Примеры в этой главе – это просто отправная точка для более детального расчета пламени. Цель этих примеров – показать, что любой расчет огня должен начинаться с самого огня и его ближайшего окружения. Это невероятная трата времени начинать проект с указания расчета огня, дыма и теплопередачи, срабатывания цели/датчика и т.д. без предварительного быстрого расчета самого огня, чтобы убедиться, что он соответствует как проверочному сжиганию, так и вашей собственной концептуальной модели.

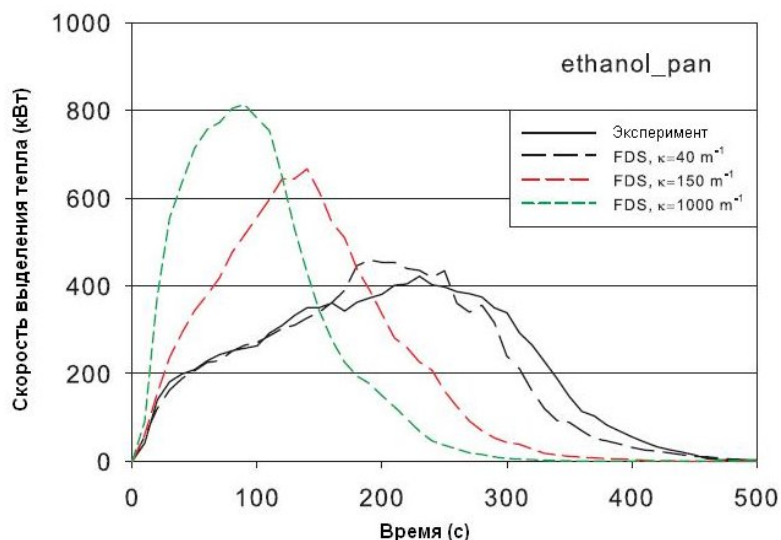
##### 19.1.1 Огонь на горючей жидкости (*ethanol\_pan*)

В этом примере стальной поддон залит тонким слоем (около 5 л, 9 мм) этанола, который выгорает примерно за 10 мин. Здесь проверяется ряд функций: горючие жидкости, многократные слои твердых тел/жидкостей, и, самое важное, коэффициент поглощения жидкости. Расчеты пиролиза в FDS до пятой версии допускали, что лучистая обратная реакция огня и горячих газов в пределах пожарного отсека поглощается у поверхности. В реальности эта энергия поглощается в глубине тела, глубина проникновения характеризуется коэффициентом поглощения  $k$ . Это свойство жидкости, а также паров газа. FDS сейчас применяет коэффициент поглощения как в отношении газов, так и твердых/жидких фаз. Ниже приведены входные строки, описывающие свойства этанола и поддона, в котором он находится:

```
&MATL      ID = 'ETHANOL LIQUID'  
    EMISSIVITY = 1.0  
    NU_FUEL = 0.97  
    HEAT_OF_REACTION = 880.  
    CONDUCTIVITY = 0.17 S  
    SPECIFIC_HEAT = 2.45  
    DENSITY = 787.  
    ABSORPTION_COEFFICIENT = 40.  
    BOILING_TEMPERATURE = 76./
```

```
&SURF      ID = 'ETHANOL POOL'  
    FYI = '4kg of ethanol in a 0.7 mx 0.8 m pan'  
    COLOR = 'YELLOW'  
    MATL_ID = 'ETHANOL LIQUID','STEEL','CONCRETE' THICKNESS = 0.0091,0.001,0.05  
    TMP_INNER = 18.
```

Результаты трех вычислений приведенных ниже, отличаются только значением `ABSORPTION_COEFFICIENT`. Результаты отдельного эксперимента тоже любезно предоставлены Айаном Томасом из Университета Виктории в Австралии [37].



### 19.1.2 Огонь от мягкой мебели (couch)

В случаях с пожаром в жилых помещениях обитая мебель составляет значительную часть горючих материалов. Один диван может произвести несколько мегаватт и иногда привести к искровому пробою. Расчет огня на мягкой мебели требует упрощения ее структуры и материалов. Как минимум мы хотели, чтобы обивка была описана как ткань, покрывающая пеноматериал:

```
&MATL ID = 'FABRIC'
```

```
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.1
DENSITY = 100.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 3000.
HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /
```

```
&MATL ID = 'FOAM'
```

```
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.05
DENSITY = 40.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 1500.
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /
```

```
&SURF ID = 'UPHOLSTERY'
```

```
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'PURPLE'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
THICKNESS(1:2) = 0.002,0.1
```

```
PART_ID = 'smoke' /
```

И ткань, и пеноматериал разлагаются на топливные газы в результате одноступенчатых реакций. Топливные газы от каждого материала имеют разный состав и теплоту сгорания. FDS автоматически подстраивает скорость потери массы каждого из них так, что «действующий» топливный газ такой, какой задал пользователь в строке REAC. Атрибут BURN\_AWAY заставляет FDS разбить диван на отдельные блоки размером с ячейку, которые исчезают из вычислений, как только заканчивается топливо. Поверхность указана как имеющая два слоя толщиной 2 мм для FABRIC и 10 см для FOAM. Величина в 10 см выбрана так, чтобы соответствовать размеру ячейки.

### 19.1.3 Распространение огня по кабельному желобу (cable\_tray)

Обычно горючими материалами в промышленных настройках являются силовые, контрольные и измерительные кабели. Кабель может быть связан в различных желобах; самый распространенный из них «лоток», похожий на лестницу. С точки зрения FDS, пучок кабеля в лотке – это сочетание разного пластика, изоляционного материала и металла, обычно меди. Есть несколько способов описания кабельного лотка:

```
&MATL ID = 'PLASTIC'
CONDUCTIVITY = 0.2
SPECIFIC_HEAT = 1.5
DENSITY = 1500.
N_REACTIONS = 1
HEAT_OF_REACTION = 3000. HEAT_OF_COMBUSTION = 25000.
REFERENCE_TEMPERATURE = 400.
NU_FUEL = 1.0 /
```

```
&MATL ID = 'COPPER'
SPECIFIC_HEAT = 0.38
CONDUCTIVITY = 387.
DENSITY = 8940. /
```

```
&SURF ID = 'Loose Cable'
COLOR = 'IVORY BLACK'
MATL_ID(1,1:2) = 'PLASTIC','COPPER' MATL_MASS_FRACTION(1,1:2) = 0.4,0.6
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.02 /
```

```
&OBST XB=-2.00, 2.00,-0.14, 0.14, 0.51, 0.55, SURF_ID='Loose Cable' /
```

```
&OBST XB=-2.00, 2.00,-0.15,-0.15, 0.50, 0.60, SURF_ID='SHEET METAL' / Tray Side
```

```
&OBST XB=-2.00, 2.00, 0.15, 0.15, 0.50, 0.60, SURF_ID='SHEET METAL' / Tray Side
```

```
&OBST XB=-1.95,-1.90,-0.15, 0.15, 0.50, 0.50, SURF_ID='SHEET METAL' / Rung
```

```
&OBST XB=-1.60,-1.55,-0.15, 0.15, 0.50, 0.50, SURF_ID='SHEET METAL' / Rung ...
```

```
&OBST XB= 1.90, 1.95,-0.15, 0.15, 0.50, 0.50, SURF_ID='SHEET METAL' / Rung
```

Пучок кабеля принимается как твердая пластина шириной 28 см и глубиной 2 см. Лоток слегка шире и глубже, и из-за того, что он указан вторым во входном файле, свойства его поверхности имеют приоритет, если кабельная пластина и лоток совпадают. Ячейка сетки в этом примере имеет сторону 5 см, а теплопередача внутри кабельной пластины управляется THICKNESS в 2 см. Пластина состоит из 60% меди по массе. Обратите внимание, в этом примере мы не принимаем в расчет составные слои – пластина представляет собой единый

слой пластика и меди. Пластик сгорает при температуре около 400°C, но остается медь. То есть кабель не «выгорает».

Суть этой проверки – предложить простую модель распространения пламени по лотку неоднородного кабеля. Подробные данные термо-физических свойств для технического кабеля обычно отсутствуют, и, даже если бы и были, возможно, результаты бы не превзошли данный расчет. Свойства, заданные в этом примере, почти полностью выдуманы. Имеют значение HEAT\_OF\_REACTION и REFERENCE\_TEMPERATURE, полученные в большинстве случаев лабораторным измерительным прибором, например, конусным калориметром.

#### 19.1.4 Горелка, распыляющая жидкое топливо (spray\_burner)

Эксперименты с контролируемым огнем часто проводятся с использованием распыляющей горелки, где жидкое топливо распыляется из форсунки и поджигается. В этом примере (spray\_burner.data) гептан из двух форсунок распыляется вниз в стальной поддон. Скорость потока повышается линейно, так что огонь увеличивается до 20МВт за 20 секунд, стабильно горит в течение следующих 20 секунд, а затем линейно уменьшается за 20 секунд. Ключевые входные параметры приведены здесь:

```
&DEVC ID='nozzle_1', XYZ=4.0,-.3,0.5, PROP_ID='nozzle', QUANTITY='TIME', SETPOINT=0. / &DEVC
ID='nozzle_2', XYZ=4.0,0.3,0.5, PROP_ID='nozzle', QUANTITY='TIME', SETPOINT=0. /
```

```
&PART ID='heptane droplets', FUEL=.TRUE., VAPORIZATION_TEMPERATURE=98.,
```

```
HEAT OF VAPORIZATION=316., SPECIFIC HEAT=2.25, DENSITY=688.,
```

```
QUANTITIES(1:2)='DIAMETER','DROPLET_TEMPERATURE',
DROPLETS PER SECOND=20 00, DIAMETER=1000., HEAT OF COMBUSTION=44500.,
DT_INSERT=0.02, SAMPLING_FACTOR=1 /
```

```
&PROP ID='nozzle', CLASS='NOZZLE', PART_ID='heptane droplets',
FLOW_RATE=1.96, FLOW_RAMP='fuel', DROPLET_VELOCITY=10.,
SPRAY_ANGLE=0.,30. /
```

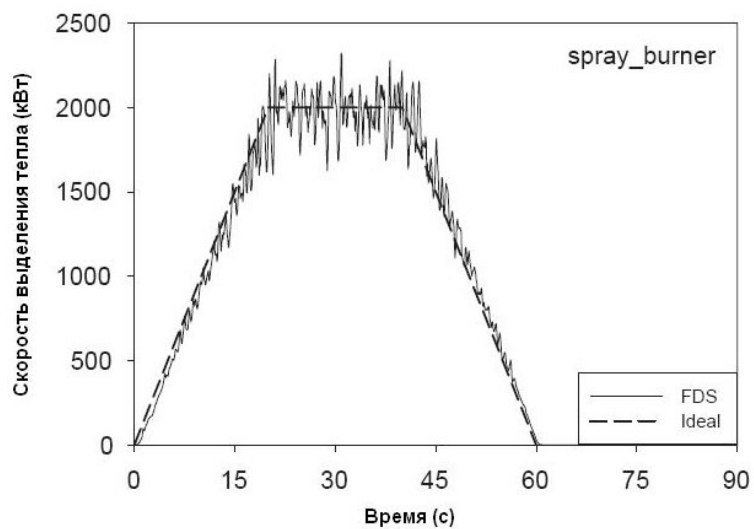
```
&RAMP ID='fuel', T= 0.0, F=0.0 / &RAMP
ID='fuel', T=20.0, F=1.0 / &RAMP ID='fuel',
T=40.0, F=1.0 / &RAMP ID='fuel', T=60.0,
F=0.0 /
```

Многие из этих параметров говорят сами за себя, а единицы приводятся в «Руководстве пользователя» [38]. Заметьте, огонь в 2 МВт получается с помощью 2 форсунок, из каждой вытекает гептан со скоростью 1,96 л/мин:

$$2 \times 1.96 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 688 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times 44500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2000 \text{ kW} \quad (19.1)$$

Параметр HEAT\_OF\_COMBUSTION корректирует этот параметр для общей схемы реакции. Таким образом, если другие капли или твердые предметы обладают другой теплотой сгорания, эффективная скорость горения настраивается так, чтобы общая скорость выделения тепла была такая, какую ожидает пользователь. Но все же, эксперименты, подобные этому, должны проводиться, чтобы подтвердить, что это именно требуемый случай. Кривая HRR для данного примера приводится здесь:





Обратите внимание, что в этом примере нет необходимости в отдельном источнике зажигания. Модель горения предполагает, что топливо и кислород сгорают в контакте, и, таким образом, небольшого количества испарения при температуре окружающей среды достаточно для начала реакции.

## Глава 20

### Анализ чувствительности

Анализ чувствительности заключается в определении степени воздействия неопределенности входных данных расчета на его результат. Параметрами расчета могут быть физические свойства твердых тел и газов, граничные условия, начальные условия и т.д. Параметры могут быть только численными, например, разрешение численной сетки. FDS обычно требует от пользователя ввести несколько десятков видов входных параметров, описывающих геометрию, материалы, процесс горения и т.д. От пользователя не требуется предоставлять никакие другие численные параметры, кроме размера сетки, хотя дополнительные численные параметры описаны как в «Техническом руководстве по применению FDS», так и в «Руководстве пользователя».

FDS не ограничивает диапазон большинства входных параметров, потому что приложения часто превышают тот диапазон параметров, для которого расчет был проверен. FDS все еще применяется в исследовательских целях NIST и в других местах, и разработчики не могут знать, какой диапазон любого из параметров является приемлемым в том или ином случае. Кроме того, FDS решает основные уравнения сохранения, и они гораздо менее подвержены ошибкам, идущим из входных параметров, которые выходят за пределы более простых эмпирических расчетов. Но все же, пользователи предупреждают о том, что он несет ответственность за написание всех параметров. Руководства FDS могут только обеспечить рекомендациями.

Размер сетки – это самый важный численный параметр в расчете, так как он задает пространственную и временную точность дискретизированного дифференциального уравнения в частных производных. Скорость теплоотдачи – это самый важный физический параметр, так как он является характеристикой источника в уравнении энергетического баланса. Такие данные о свойствах, как теплопроводность, плотность, тепло испарения, теплоемкость и т.д. должны быть оценены через их влияние на скорость теплоотдачи. Исследования на пригодность показали, что FDS хорошо прогнозирует перенос тепла и дыма, когда прописан HRR (скорость выделения тепла). В этих случаях небольшие изменения в свойствах граничных поверхностей не оказывают большого влияния на результаты. Но если HRR не прописана, а спрогнозирована расчетом с помощью теплофизических свойств топлива, выходные данные расчета зависят даже от небольших изменений этих свойств.

Все анализы чувствительности, описываемые в этой главе, выполняются в основном одинаково. Для заданного сценария сделаны оценки всех необходимых параметров, и выполнен «базовый» расчет. Затем один за другим параметры изменяются на заданный процент, и записываются изменения прогнозируемых результатов. Это самый простой способ анализа чувствительности. Более сложные способы, включающие одновременные вариации нескольких параметров, становятся непрактичными с расчетами CFD, потому что период расчета очень долгий и количество параметров слишком велико, чтобы выполнить необходимый объем вычислений для составления качественной статистики.

## 20.1 Чувствительность сетки

Самое важное решение, которое нужно задать пользователю – это размер численной сетки. Обычно, чем мельче сетка, тем лучше численное решение уравнений. У FDS точность второго порядка в пространстве и времени, что означает, что уменьшение размера ячейки сетки вдвое уменьшит ошибку дискретизации в определяющих уравнениях в 4 раза. Из-за нелинейности уравнений уменьшение ошибки дискретизации необязательно переходит в сравнимое сокращение ошибки заданной выходной величины FDS. Чтобы узнать, как уточнение сетки влияет на решение, пользователи обычно делают некое подобие анализа чувствительности сетки, в котором численная сетка систематически умельчается до тех пор, пока выходные величины не перестанут заметно меняться с каждым умельчением. Конечно, с каждым уменьшением размера ячейки в два раза время, требуемое для расчетов, увеличивается в  $2^4=16$  (множитель два для каждой пространственной координаты плюс время). В конце концов, находится оптимальное решение для точности расчета и мощности компьютера.

Некоторые исследования чувствительности сетки были документированы и опубликованы. С тех пор, как FDS впервые была выпущена в 2000г., в расчеты были включены значительные изменения в подпрограммы горения и излучения. Но основной алгоритм передачи тот же самый, также как и критическая важность чувствительности сетки. При объединении исследований чувствительности были исключены только те, которые касались чувствительности подпрограмм, более не применяющихся.

В рамках проекта по оценке применения первой версии FDS в отношении больших механически вентилируемых закрытых пространств Фрайди [39] провел анализ чувствительности на предмет приблизительного времени расчета, основанного на разных размерах сетки. В FDS было рассчитано горение пропилен с номинальной скоростью теплоотдачи. Механической вентиляции не было, и предполагалось, что огонь будет возрастать как функция времени от начала возгорания, возведенная в квадрат. Пожарный отсек имел размеры 3 м x 3 м x 6,1 м. Температура замерялась на расстоянии 12 см ниже потолка. Для анализа были выбраны четыре размера сетки: 30 см, 15 см, 10 см, 7,5 см. Значительных изменений температуры с изменением размера сетки замечено не было.

Используя первую версию FDS, Боунагуэй совместно с коллегами [40] исследовал влияние размера сетки на результаты расчетов, чтобы определить номинальный размер сетки для дальнейшей работы. Была рассчитана пропановая горелка 0,1м x 0,1м со скоростью теплоотдачи 1500 кВт. Похожий анализ был выполнен с использованием отношения Альперта припотолочной струи [41], который также показал лучшее прогнозирование на меньших размерах сетки. В смежных исследованиях Боунагуэй с коллегами [42] применял FDS для расчета способов аварийной вентиляции в туннеле Луи-Ипполита Лафонтена в Монреале в Канаде.

Синь [43] использовал FDS для расчета квадратной (1 м x 1м) горелки на метане в открытом пространстве. Инженерные корреляции для температуры на осевой линии факела и профилей скорости сравнивались с расчетными прогнозами с целью оценить влияние численной сетки и размера вычислительного домена. Результаты показали, что FDS реагирует на изменения размера сетки, особенно около поверхности топлива, и на размер домена, если его ширина меньше, чем две ширины факела. В FDS предполагается, что давление постоянно на открытых границах. Это предположение повлияет на поведение пламени, если граница вычислительного домена находится слишком близко к факелу.

Иерарди и Барнетт [44] использовали третью версию FDS для расчета диффузионной метановой горелки размером 0,3м<sup>2</sup> со значениями скорости выделения тепла от 14,4 кВт до 57,5 кВт. Используемый физический домен имел размер 0,6 м x 0,6 м с равномерной разбивкой сетки в 15, 10, 7,5, 5, 3, 1,5 см для всех трех координатных направлений. Для обоих размеров огня разбивка сетки в 1,5 см оказалась наилучшим решением при сравнении температуры на оси пламени Маккеффри и отношений скорости [45]. Два похожих сценария,

которые составляют основу отношения припотолочной струи Альперта, также рассчитаны FDS. Первый сценарий составлял 1 м x 1 м, 670 кВт, этаноловый огонь под неограниченным потолком высотой 7 м. Плоские измерения вычислительного домена были равны 14 м x 14 м. В расчете применялись четыре равномерных разбивки сетки в 50, 33,3, 25 и 20 см. Лучшим решением для максимальной температуры струи у потолка оказалась разбивка в 33,3 см. Лучшим решением для максимальной скорости припотолочной струи оказалась разбивка в 50 см. Вторым сценарием было 0,6 м x 0,6 м, этаноловый огонь в 1000 кВт под неограниченным потолком высотой в 7,2 м. Длина и ширина вычислительного домена были равны 14,4 м x 14,4 м. В расчете использовались три равномерные разбивки в 60, 30 и 20 см. Результаты показывают, что разбивка сетки в 60 см является лучшим решением для отношения как максимальной температуры припотолочной струи, так и для скорости.

Петтерсон [46] также завершил работу, получив оптимальный размер сетки для второй версии FDS. Расчеты FDS, выполненные на сетках разных размеров, сравнивались с двумя независимыми пожарными экспериментами: The University of Canterbury McLeans Island Tests (островные испытания Маклинза Кентерберийского университета) и the US Navy Hangar Tests (ангарные испытания морского флота США) на Гавайях. В первом цикле исследований использовалась комната с приблизительными размерами 2,4 м x 3,6 м x 2,4 м и мощность огня 55 кВт и 110 кВт. The Navy Hangar tests (морские ангарные исследования) проходили в ангаре размером 98 м x 74 м x 15 м, а огонь от 5,5 МВт до 6,6 МВт. Результаты этого исследования говорят о том, что расчеты FDS с сеткой 0,15 м дают такие же точные прогнозы температуры, как и расчеты с размером сетки 0,10 м. Каждый из этих размеров сетки дал результаты в пределах 15% (точности) замеров температуры Кентерберийского университета. Сетка в 0,30 м дала менее точные результаты. Для сравнения с морскими ангарными исследованиями, размеры сеток от 0,60 м до 1,80 м дали результаты соизмеримой точности.

Муссер совместно с коллегами [47] исследовала расчеты на грубой сетке в сценариях с огнем и без него. Определение подходящего размера ячейки оказалось особенно важным, для учета теплопередачи на нагретых поверхностях. Конвективная теплопередача от нагретых поверхностей была наиболее точной, когда возле поверхности ячейки сетки были меньше глубины прогретого граничного слоя. Тем не менее, более мелкий размер сетки дал лучшие результаты за счет времени вычисления. Точный расчет рассеивания загрязнителя требовал гораздо более мелкую сетку. Результаты ее исследования показывают, что расчеты без огня можно завершить быстрее, чем с огнем, потому что шаг по времени не ограничен большими скоростями потоков в факеле.

## 20.2 Чувствительность параметров масштабного моделирования вихрей

FDS применяет модель Смагоринского как способ масштабного моделирования вихрей. Это означает, что вместо применения действительной вязкости жидкости расчет использует вязкость вида:

$$\mu_{LES} = \rho (c_s \Delta)^2 |S|^{\frac{1}{2}} \quad (20.1)$$

где  $C_s$  – эмпирическая постоянная,  $\Delta$  – длина порядка размера ячейки, а член деформации  $|S|$  относится к функции рассеивания, заданной уравнением (?). Соизмеримые выражения для теплопроводности и коэффициента диффузии материала, относятся к «турбулентной вязкости»:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr}; (pD)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (20.2)$$

Число Прандтля  $Pr$  и число Шмидта  $Sc$  подобным образом считаются «турбулентными» значениями. Следовательно,  $C_s$ ,  $Pr$  и  $Sc$  – это совокупность эмпирических постоянных.

Большинство пользователей FDS просто пользуются значениями по умолчанию (0,2, 0,5, 0,5), но некоторые из них исследовали их влияние на решение уравнений.

В попытке проверить FDS некоторыми простыми данными комнатной температуры Чжан с коллегами [48] испытали различные комбинации параметров Смагоринского и предложили текущие значения по умолчанию. Из всех трех параметров постоянная Смагоринского  $C_s$  самая чувствительная. Смагоринский [49] изначально предложил значение 0,23, но исследователи на протяжении последних трех десятилетий пользовались значениями от 0,1 до 0,23. Существуют доработки первого расчета Смагоринского [50, 51, 52], в которых от пользователя не требуется прописывание постоянных, они вычисляются автоматически по численной схеме.

### 20.3 Чувствительность параметров излучения

Лучистая теплопередача включена в FDS через решение уравнения переноса излучения для нерассеивающегося серого газа, а в некоторых ограниченных случаях с помощью широкополосной модели. Уравнение решено способом, схожим с методом конечных объемов (Finite Volume Method - FVM). Существует несколько ограничений модели. Во-первых, коэффициент адсорбции насыщенного дымом газа – это сложная функция его состава и температуры. Из-за упрощенного расчета горения химический состав дымовых газов, особенно содержание сажи, может повлиять и на адсорбцию, и на распространение теплового излучения. Во-вторых, перенос излучения дискретизируется примерно 100 телесных углов. Для точек, расположенных далеко от локализованного источника излучения, например, разрастающегося огня, дискретизация может привести к неравномерному распределению лучистой энергии. Это можно увидеть при визуализации температур поверхности, где «горячие пятна» показывают влияние ограниченного числа телесных углов. Проблему можно уменьшить путем включения большего количества телесных углов, но за счет увеличения времени вычислений. В большинстве случаев лучистый поток к далеко расположенным точкам не так важен, как поток к близким точкам, где покрытие по числу углов по умолчанию гораздо лучше.

Хостикка совместно с коллегами исследовали чувствительность лучистого решателя к изменениям в предполагаемом образовании сажи, количестве спектральных полос, количестве контрольных углов и температуре пламени. Некоторые из наиболее интересных находок следующие:

- Изменение количества сажи с 1% до 2% увеличило лучистый поток от рассчитываемой метановой горелки примерно на 15%.
- Снижение количества сажи до нуля уменьшило лучистый поток примерно на 20%.
- Увеличение числа контрольных углов в три раза было необходимо для обеспечения точности расчета в отдельных точках измерений.
- Изменение количества спектральных полос с 6 до 10 не оказало значительного эффекта на результаты.
- Ошибки в тепловом потоке на 100% были вызваны ошибками в абсолютной температуре на 20%.

Чувствительность температуры пламени и состав сажи соответствует теории горения, которая гласит, что источниковый член в уравнении лучистого переноса – это функция коэффициента адсорбции, умноженного на абсолютную температуру, возведенную в четвертую степень. Количество контрольных углов и спектральных полос – это численные параметры, контролируемые пользователем, чувствительность которых должна проверяться для каждого нового сценария. Значения по умолчанию в FDS подходят для большинства

крупномасштабных сценариев с огнем, но может требовать доработки для более подробных расчетов, например, для метановой горелки с низким образованием сажи.

## 20.4 Чувствительность теплофизических свойств твердого топлива

Большая работа по проверке четвертой версии FDS была проведена Хьетаниеми, Хостиккой и Ваариат, VTT из Финляндии [53]. Исследования ситуаций заключались в экспериментах с огнем, варьирующихся от конусного калориметра (ISO 5660-1) до полномасштабных испытаний, таких как испытания в углу комнаты (ISO 9705). Также сравнивались результаты FDS и данные, полученные с помощью устройств для проведения испытаний для европейской классификации отдельного горящего предмета SBI (Single Burning Item) (EN 13823), а также данные, полученные в двух специальных экспериментальных конфигурациях: одна сходна с испытаниями в углу комнаты, но имеет только частичную облицовку, а другая представляет собой пространство для изучения пожаров в строительных котлованах.

Во всех исследованиях ситуаций применялись реальные материалы, свойства которых должны прописываться таким образом, чтобы соответствовать предположению, что в FDS позади твердых тел, имеющих однородный состав, находится материал, который либо холодный, либо полностью изолирующий. Чувствительность разных физических свойств и граничных условий были проверены. Вот некоторые из выводов:

- Измеренная скорость горения разных материалов часто находится между двумя прогнозами FDS, где холодные или изолированные нижележащие материалы принимались за твердые поверхности. В FDS не хватает многослойных расчетов твердых тел.
- Время возгорания обивки зависит от термических свойств покрывающего материала, но стабильная скорость горения зависит от свойств подложки.
- Содержание влаги в деревянном топливе очень важно, и его трудно измерить.
- Распространение пламени над сложными объектами, например, над проводами, уложенными в лотки, можно рассчитать, если площадь поверхности упрощенного объекта сравнима с площадью поверхности реального объекта. Предполагается, что есть зависимость не только от физических свойств, но и от геометрии. Степень геометрической зависимости измерить сложно.

В исследованиях наблюдаемые зависимости измерены мало. Кривые роста огня по форме могут быть от линейных до экспоненциальных, и небольшие изменения в свойствах топлива могут привести к изменению порядка величины в скорости теплоотдачи для случаев свободного огня. Эта тема обсуждается в «Руководстве по проверке FDS» [?], где во многих исследованиях отмечается, что прогнозирование распространения огня затруднено.

Недавно Лаутенбергер, Рейнанд Фернандез-Пелло [54] разработали метод для автоматизации процесса оценки свойств материала для ввода их в FDS. Методология включает расчет лабораторных измерений с моделью и итерированием через «генетический» алгоритм для получения оптимальной совокупности свойств материала для этого конкретного предмета. Подобные способы необходимы, потому что большинство лабораторных устройств не обеспечивают полный набор термических свойств.

## 20.5 Резюме

Основа расчетов больших вихрей состоит в том, что точность увеличивается с уменьшением численной сетки. Для случаев с огнем исследования чувствительности сетки показали, что точность расчета – это функция характеристического диаметра огня  $D^*$ , поделенного на размер ячейки сетки. Описать разрешение вычислений только в виде размера ячейки

недостаточно, нужен размер ячейки по отношению к скорости теплоотдачи. Для случаев без огня нет простых способов оценить «хорошее разрешение».

Практика показывает, что при расчетах ограниченного разрешения прогнозы FDS более надежны для отдаленных областей, потому что реальная численная диффузия имитирует неразрешенное смешивание подсеточного масштаба. Трудно определить количественно, не сравнивая с экспериментальными данными. В некоторых исследованиях чувствительности, обсуждаемых выше, авторы находили оптимальный размер ячейки и часто он оказывался не наименьшим из тестируемых. В этом случае авторы нашли сценарий потока, где неразрешенное конвективное смешивание почти точно компенсировано численной диффузией. Это происходит случайно, но этот вывод необязательно касается других сценариев. Недостаток любого расчета турбулентности, включая расчет большого вихря, в том, что хорошие результаты не гарантированы в сетках ограниченного разрешения. Преимущество LES перед другими расчетами турбулентности в том, что решение действительных определяющих уравнений, а не уравнений с временным или пространственным усреднением, вычисляется по мере того, как сетка мельчает.

То же самое можно сказать о явлениях, происходящих около огня. Но разрешение сетки имеет более принципиальное значение для процессов вблизи огня, так как численная диффузия вблизи огня в крупных сетках не имеет такого же случайного эффекта, какой оказывается на результаты отдаленных областей. В целом, крупное разрешение уменьшит температуру и скорость, растягивая значения над большими ячейками. Это может повлиять на лучистый поток, конвекцию к окружающим твердым телам, окончательное распространение пожара и пламени.

## **Часть IV**

### **Работа с исходным кодом FDS**



## Глава 21

### Компиляция FDS

В этом разделе говорится о том, что вам нужно знать, если вы сами хотите скомпилировать исходную программу FDS. Здесь не дается пошаговое руководство, более подробные инструкции можно найти в разделе разработки на сайте <http://fire.nist.gov/fds>.

Если есть скомпилированная версия FDS для машины, на которой будет проводиться расчет, и первоначальную исходную программу никак не меняли, то программу снова компилировать не надо. Например, **file fds5.exe** – скомпилированная программа для одного процессора для Windows; т.е. пользователю не нужен компилятор Fortran и не нужно компилировать исходную программу. Для машин, для которых не был скомпилирован выполняемый файл, программу компилировать нужно. Для компиляции необходимы компиляторы Fortran 90/95 и C.

#### 21.1 Исходный код программы FDS

В таблице 21.1 приведены файлы, составляющие исходный код. Файлы с суффиксом “.f90” содержат указания Fortran 90 в свободной форме, которые соответствуют стандартам ANSI и ISO за некоторыми исключениями, о которых говорится ниже. Исходные файлы должны быть скомпилированы в том порядке, в каком они указаны в таблице 21.1, потому что некоторые подпрограммы зависят от других. Для пользователей Unix/Linux имеются полезные при компиляции **Makefiles** для разных платформ. Функции компилятора отличаются от платформы к платформе. Обратите внимание на следующее:

- Исходная программа в основном состоит из операторов Fortran 90, упорядоченных примерно в 25 файлов плюс добавочный файл, содержащий некоторые дополнительные подпрограммы C, которые нужны для вывода в Smokeview. Весь код C содержится в файле под названием **isob.c**.
- Помните, что разные компиляторы по-разному обходятся с названиями подпрограмм C. Некоторые компиляторы добавляют знак подчеркивания к названиям подпрограмм C, которые вызываются программами Fortran. Если компилятор делает ошибку, распространяющуюся на названия подпрограмм, которые не распознаются, воспользуйтесь директивой предварительной обработки компилятора C `pp_noappend`, чтобы компилятор не добавлял знак подчеркивания к названиям подпрограмм C.
- В программе Fortran есть только один нестандартный запрос. Это **GETARG**, в **func.f90**. Эта программа считывает название входного файла с командной строки. Этот запрос нельзя просто закомментировать; нужно найти подходящую альтернативу. Единственная необходимая опция компилятора в дополнение к тем, которые нужны для решения обозначенных проблем, служит полной оптимизации (обычно `-O` или другая разновидность). У некоторых компиляторов есть стандартный уровень оптимизации плюс разные степени «агрессивной» оптимизации. Будьте осторожны на высших уровнях оптимизации.
- Для однопроцессорной версии FDS компилируйте **main.f90**.
- Параллельная версия FDS использует **main\_mpi.f90** вместо **main.f90** плюс нужно, чтобы были установлены дополнительные библиотеки MPI. Подробности о MPI

можно найти на веб-сайте вместе со ссылками на необходимые организации, разработавшие свободные библиотеки MPI.

Таблица 21.1 **Файлы исходной программы**

Название файла	Описание
isob.c	CRoutine for computing isosurfaces and 3D smoke Подпрограмма C для расчета изоповерхностей и трехмерного дыма
prec.f90	Specification of numerical precision Определение численного разрешения
smvv.f90	Interfaces for C routines used for Smokeview output Интерфейсы для подпрограмм C, используемых для вывода в Smokeview
devc.f90	Derived type definitions and constants for devices' Определения производного типа и постоянные для устройств
type.f90	Derived type definitions Определения производного типа
mesh.f90	Arrays and constants associated with each mesh Массивы и постоянные для каждой сетки
cons.f90	Global arrays and constants Глобальные массивы и постоянные
func.f90	Global functions and subroutines Глобальные функции и подпрограммы
irad.f90	Functions needed for radiation solver, including RadCal Функции для решателя излучения, включая RadCal
ieva.f90	Support routines for evac.f90 Служебные подпрограммы для evac.f90
evac.f90	Egress computations (future capability) Расчет средств эвакуации (функция доступна в перспективе)
pois.f90	Poisson (pressure) solver Решатель Пуансона (давление)
radi.f90	Radiation solver Решатель излучения
part.f90	Lagrangian particle transport and sprinkler activation Перемещение лагранжевых частиц и активация спринклеров
ctrl.f90	Definitions and routines for control functions Определения и подпрограммы для контрольных функций
dump.f90	Output data dumps into files Вывод выходных данных в файлы
read.f90	Read input parameters Параметры сигнала считывания
mass.f90	Mass equation(s) and thermal boundary conditions Уравнение/я массы и тепловые/термальные

		граничные условия
wall.f90		Wall boundary conditions Граничные условия стен
fire.f90		Combustion routines Подпрограммы горения
pres.f90		Spatial discretization of pressure (Poisson) equation Пространственная дискретизация уравнения давления (Пуассона)
divg.f90		Compute the flow divergence Вычислить дивергенцию потока
init.f90		Initialize variables and Poisson solver Инициализировать переменные и решатель Пуассона
velo.f90		Momentum equations Уравнения импульса движения
main.f90 main_mpi.f90	or	Main programs, serial and parallel versions Основные программы, серийные и параллельные версии

## Глава 22

### Форматы выходных файлов

Выходные данные программы состоят из файла **CHID.out**, плюс другие файлы данных, описанные ниже. Большинство этих выходных файлов записываются подпрограммой **dump.f** и легко могут быть приспособлены под разные пакеты программ графического вывода.

#### 22.1 Диагностические выходные данные

Файл **CHID.out** состоит из ряда входных параметров и расчетов различных важных величин, включая использование ЦПУ. Обычно диагностическая информация выводится каждые 100 шагов по времени.

Iteration (итерация) 8300 May 16, 2003 08:37:53

Mesh (сетка) 1, Cycle (цикл) 3427

CPU/step (ЦПУ/шаг): 2.272 s, Total CPU (общее ЦПУ): 2.15 hr

Time step (шаг по времени): 0.03373 s, Total time (общее время): 128.86 s

Max CFL number (макс. число КФЛ): 0.86E+00 at (21, 9, 80)

Max divergence (макс. дивергенция): 0.24E+01 at (25, 30, 22)

Min divergence (мин. дивергенция): -.39E+01 at (26, 18, 31)

Number of Sprinkler Droplets (количество разбрызгиваемых капель): 615

Total Heat Release Rate (полная скорость теплоотдачи): 7560.777 kW

Radiation Loss to Boundaries (потери излучения на границах): 6776.244 kW

Mesh (сетка) 2, Cycle (цикл) 2914

CPU/step (ЦПУ/шаг): 1.887 s, Total CPU (общее ЦПУ): 1.53 hr

Time step (шаг по времени): 0.03045 s, Total time (общее время): 128.87 s

Max CFL number (макс. число КФЛ): 0.96E+00 at (21, 29, 42)

Max divergence (макс. дивергенция): 0.20E+01 at (22, 20, 22)

Min divergence (мин. дивергенция): -.60E+01 at (7, 26, 48)

Number of Sprinkler Droplets (количество разбрызгиваемых капель): 301

**Номер итерации** показывает, сколько шагов по времени выполнила программа, а **номер цикла для заданной сетки** показывает, сколько шагов по времени было выполнено в этой сетке.

**Дата и время** (текущее) указываются в строке, начинающейся со слова «итерация». Величина **ЦПУ/шаг** – это период времени ЦПУ, требуемый для завершения шага по времени для этой сетки; **общее ЦПУ** – это время ЦПУ, прошедшее с момента запуска прогона; **шаг по времени** – это величина шага по времени для заданной сетки; **общее время** – это время расчета; **макс./мин. дивергенция** – это максимальное/минимальное значение функции  $\nabla \cdot u$  и применяется для диагностики, когда поток не сжимается (т.е. нагрева нет); и **макс. число КФЛ** – это максимальное число КФЛ. **Потеря излучения на границах** – это количество энергии, излучаемой через границы. По мере нагревания пожарных отсеков энергия, теряемая на границах, может составить значительную долю суммарной скорости выделения тепла. Наконец, **число частиц-трассировщиков** показывает, сколько пассивных частиц отслеживается в момент времени.

По завершении успешного прогона записывается отчет об использовании ЦПУ каждой подпрограммой. Это полезно при определении этапа, на котором совершается больше всего вычислительной работы.

## 22.2 Скорость выделения тепла и связанные с ней величины

Скорость выделения тепла огнем плюс другие глобальные величины, связанные с энергией автоматически вписываются в текстовый файл **CHID\_hrr.csv**. Формат файла следующий:

```
s,kW,kW,kW,kW,kg/s,atm,atm
FDS_HRR_Time,HRR,RAD_LOSS,CONV_LOSS,COND_LOSS,BURN_RATE,ZONE_01,ZONE
_02,...
0.0000000E+000, 0.0000000E+000, ...
3.5355338E-001, 0.0000000E+000, ...
.
.
.
```

HRR – общая скорость выделения тепла, RAD\_LOSS – потери теплового излучения на границах. CONV\_LOSS – скорость, с которой энергия вытекает (положительная) и втекает (отрицательная) в домен. COND\_LOSS – скорость, с которой энергия проводится в твердое тело через поверхность (положительная) и отдается (отрицательная). BURN\_RATE – общая/суммарная скорость массовой потери. ZONE\_01 и т.д. – фоновое давление разных зон давления.

## 22.3 Выходные данные об устройствах

Данные, связанные с конкретными устройствами (температурные цепи, затемнение дыма, термопары и т.д.), описанные во входном файле как группа DEVC выводятся в формате с запятой-разделителем в файле **CHID\_devc.csv**. Файл имеет следующий формат:

```
S          , UNITS(1) , UNITS(2) , ..... , UNITS(N_DEVC)
FDS Time , ID(1)      , ID(2)      , ..... , ID(N_DEVC)
T(1)     , VAL(1,1)   , VAL(2,1)   , ..... , VAL(N_DEVC,1)
T(2)     , VAL(1,2)   , VAL(2,2)   , ..... , VAL(N_DEVC,2)
.
.
.
```

где N\_DEVC – это количество устройств, ID(I) – ID I-го устройства, определяемый пользователем, UNITS(I) – единицы измерения, T(J) – время J-го вывода, VAL(I,J) – значение на I-ом устройстве во время J. Файлы можно импортировать в Microsoft Excel или практически в любую программу обработки электронных таблиц. Если количество колонок превышает 256, файл автоматически будет разбит на более мелкие файлы.

## 22.4 Контрольные выходные данные

Данные, связанные с определенными контрольными функциями, указанными во входном файле в группе CTRL, выводятся в формате с запятыми-разделителями в файле с названием **CHID\_ctrl.csv**. Формат файла следующий:

```
s,status,status,status
FDS Time,ID(1),ID(2),...,ID(N_CTRL)
0.00000E+000,-001, 001, ...
1.11803E-001,-001,-001, ...
.
.
.
```

где N\_CTRL – число контрольных функций, ID(I) – ID I-ой контрольной функции, определяемый пользователем и плюс или минус один обозначают положение I-ой контрольной функции в определенное время: -1 = .FALSE. и +1 = .TRUE. Файлы можно импортировать в Microsoft Excel или практически в любую программу обработки электронных таблиц. Если количество колонок превышает 256, файл автоматически будет разбит на более мелкие файлы.

## 22.5 Данные о массе газа

Общая масса различных газообразных веществ в любой момент времени выводится в файл с запятыми-разделителями **CHID\_mass.csv**. Файл состоит из нескольких колонок: в первой указывается время в секундах, во второй общая масса всех газообразных веществ в вычислительном домене в кг, а в следующих строках общая масса отдельных веществ.

## 22.6 Зависимость от состояния доли в смеси

Функциональная зависимость массовой доли реагирующих веществ и продуктов горения от доли в смеси выводится в файле **CHID\_state\_II.csv** с запятыми-разделителями. Файл состоит из 10 колонок: в первой указана величина доли в смеси, в последней - средний молекулярный вес, а во всех остальных – массовая доля газов, где II обозначает химическую реакцию, для которой приведена зависимость состояния вещества. Для модели с двумя параметрами это 01 для полной реакции (образование продуктов горения) и 02 нулевой реакции (тушение). Для модели с тремя параметрами 01, 02 и 03 для неполной реакции (образование CO), полной реакции (образование CO<sub>2</sub>) и нулевой реакции соответственно.

## 22.7 Файлы слоя

Файлы слоя из группы SLCF под названием **CHID\_n.sf** ( $n=01,02\dots$ ) выписываются неформатированными, если не указано другое. Эти файлы выписываются из **dump.f** со следующими строками:

```
WRITE(LUSF) QUANTITY
WRITE(LUSF) SHORT_NAME
WRITE(LUSF) UNITS
WRITE(LUSF) I1,I2,J1,J2,K1,K2
WRITE(LUSF) TIME
WRITE(LUSF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
.
.
.
WRITE(LUSF) TIME
WRITE(LUSF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
```

QUANTITY, SHORT\_NAME и UNITS – символьные строки длиной в 30 символов. (I1,I2,J1,J2,K1,K2) обозначает узлы граничных ячеек сетки. Шестерка индексов соответствует узлам (углам) ячейки, т.е. вся сетка описывается ею (0,IBAR,0,JBAR,0,KBAR).

Программа на Fortran 90 под названием **fds2ascii.f** преобразовывает файлы слоя в текстовые, которые могут читаться многими графическими программами. Программа объединяет множественные послойные файлы, соответствующие одному и тому же «слою»

вычислительного домена, находит среднее значение данных по времени и записывает значения в один файл, состоящий из строки чисел для каждого узла. В каждой строке содержатся физические координаты узла и усредненные по времени величины, соответствующие этому узлу. В частности, графическая программа Tecplot распознает эти файлы и создает контуры, линии тока и/или векторные диаграммы. Дополнительную информацию о программе **fds2ascii.f** можно найти в разделе 12.4.

## 22.8 Данные Plot3D

Величины по всей сетке могут выходить в формате, применяемом графическим пакетом Plot3D. Блоки данных Plot3D могут быть одинарной точности (32-битные действительные числа), целыми и не форматированными. Имейте в виду, действует гашение, т.е. точки заблокированных данных графически не выводятся. Если выражение `WRITE_XYZ=.TRUE.` включено в строку `DUMP`, данные сетки выписываются в файл под названием **CHID.xyz**

```
WRITE(LU13) IBAR+1,JBAR+1,KBAR+1
WRITE(LU13) (((X(I),I=0,IBAR),J=0,JBAR),K=0,KBAR),
.           (((Y(J),I=0,IBAR),J=0,JBAR),K=0,KBAR),
.           (((Z(K),I=0,IBAR),J=0,JBAR),K=0,KBAR),
.           (((IBLK(I,J,K),I=0,IBAR),J=0,JBAR),K=0,KBAR)
```

Где  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  – координаты углов сетки, а  $IBLK$  – показатель того, не заблокирована ли ячейка. Если точка  $(X,Y,Z)$  полностью располагается внутри области твердого тела,  $IBLK$  равен нулю. В противном случае  $IBLK=1$ . Обычно файл сетки не выводится.

Переменные потока записываются в файл под названием **CHID\_\*\*\*\*\_\*\*.q**, где звездочки обозначают время выхода данных. В файле записываются строки

```
WRITE(LU14) IBAR+1,JBAR+1,KBAR+1
WRITE(LU14) ZERO,ZERO,ZERO,ZERO
WRITE(LU14) (((((QQ(I,J,K,N),I=0,IBAR),J=0,JBAR),K=0,KBAR),N=1,5)
```

Пять каналов  $N=1..5$  по умолчанию температура по Цельсию ( $^{\circ}\text{C}$ ), элементы скорости  $u$ ,  $v$  и  $w$  (м/с) и скорость выделения тепла на единицу объема ( $\text{кВт/м}^3$ ). Другие переменные можно описать с помощью входного параметра `PLOT3D_QUANTITY(1:5)` в строке `DUMP`. Помните, что данные интерполированы в узлах сетки, и, таким образом, размерность блоков данных Plot3D больше на единицу, чем размерность вычислительной сетки.

Smokeview может отобразить данные Plot3D. Также они могут читаться некоторыми другими графическими программами, поддерживающими этот формат данных. Этот формат очень удобен и распознается рядом графических пакетов, включая AVS, IRIS Explorer и Tecplot<sup>1</sup>.

## 22.9 Граничные файлы

Граничные файлы, описанные в группе `BNDF`, называются **CHID\_n.bf** ( $n=01,02\dots$ ) и записываются неформатированными. Они записываются из **dump.f** со следующими строками:

<sup>1</sup> За исключением Smokeview, графические пакеты, упомянутые в настоящем документе, не включены в исходный код, их можно приобрести дополнительно.

```

WRITE(LUBF) QUANTITY
WRITE(LUBF) SHORT_NAME
WRITE(LUBF) UNITS
WRITE(LUBF) NPATCH
WRITE(LUBF) I1,I2,J1,J2,K1,K2,IOR
WRITE(LUBF) I1,I2,J1,J2,K1,K2,IOR
.
.
WRITE(LUBF) TIME
WRITE(LUBF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
WRITE(LUBF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
.
.
WRITE(LUBF) TIME
WRITE(LUBF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
WRITE(LUBF) (((QQ(I,J,K),I=11,I2),J=J1,J2),K=K1,K2)
.
.

```

QUANTITY, SHORT\_NAME и UNITS – символьные строки длиной в 30 знаков. NPATCH – количество плоскостей (или «участков»), составляющих твердые границы и внешние стенки. Шестерка (I1,I2,J1,J2,K1,K2) описывает узлы ячейки на каждом участке. IOR – целое число, показывающее направление участка ( $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ). Вы их не прописываете. Помните, что данные планарные, т.е. одна пара узлов ячеек одинаковая.

В настоящее время Smokeview единственная программа, с помощью которой можно просмотреть граничные файлы.

## 22.10 Данные о частицах

Координаты частиц-трассировщиков и капель распылителя и связанные с ними величины хранятся в неформатированном (двоичном) файле FORTRAN под названием **CHID.prt5**. Обратите внимание, формат этого файла не такой, как в предыдущих версиях (четвертой и более ранних). Файл состоит из некоторой информации в заголовке, затем следует вывод данных о частицах каждые DT\_PART секунд. Временное приращение DT\_PART указывается в строке DUMP. Это T\_END/NFRAMES по умолчанию. Информация в заголовке записывается следующей программой FORTAN в файле **dump.f90**.

```

WRITE (LUPF) ONE_INTEGER          ! число ONE – 4-битное действительное число
WRITE (LUPF) NINT (VERSION*100.)  ! номер версии FDS
WRITE (LUPF) N_PART              ! количество классов частиц
DO N=1,N_PART
  PC => PARTICLE_CLASS(N)
  WRITE (LUPF) PC%N_QUANTITIES,ZERO_INTEGER ! ZERO_INTEGER - символ-
  заполнитель
  DO NN=1,PC%N_QUANTITIES
    WRITE (LUPF) CDATA(PC%QUANTITIES_INDEX(NN)) ! выходная величина из 30
    СИМВОЛОВ
    WRITE (LUPF) UDATA(PC%QUANTITIES_INDEX(NN)) ! устройство вывода из 30
    СИМВОЛОВ
  ENDDO
ENDDO
ENDDO

```



Каждые DT\_PART секунд координаты частиц и капель выводятся как 4-битные действительные числа:

```
WRITE (LUPF) REAL(T,FB) ! Записывает время T 4-битным действительным числом
WRITE (LUPF) NPLIM      ! количество частиц, которые нужно выписать для этого шага по
времени
WRITE(LUPF) (XP(I),I=1,NPLIM),(YP(I),I=1,NPLIM),(ZP(I),I=1,NPLIM)
WRITE(LUPF) (TA(I),I=1,NPLIM) ! целое число «tag» для каждой частицы
IF (PC%N_QUANTITIES > 0)
```

Частица «tag» применяется Smokeview для отслеживания отдельных частиц и капель, чтобы изобразить направления потока. Это также удобно при анализе файла. Данные о величине, QP (I,NN), используются Smokeview для цветового обозначения капель и частиц. Обратите внимание, что сейчас благодаря новому формату можно обозначать частицы и капли цветами несколькими разными величинами.

### 22.11 Файлы профилей

Файлы профилей, описанные в группе PROF, называются **CHID\_prof\_nn.csv** (nn=01,02...) и записываются форматированными. Они записываются из **dump.f** со следующей строкой:

```
WRITE(LU_PROF) T,NWP+1,(X_S(I),I=0,NWP),(Q(I),I=0,NWP)
```

После времени T указывается количество узлов, а потом их координаты. Они записываются каждый шаг по времени, потому что толщина стенки и местная сетка твердой фазы могут измениться со временем из-за реакций в твердой фазе. Массив Q содержит значения выходной величины, которая может быть температурой стены, плотностью и плотностью компонента.

## Список литературы

- [1] K.B. McGrattan, S. Hostikka, J.E. Floyd, H.R. Baum, and R.G. Rehm. Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, October 2007.
- [2] G.P. Forney. User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. NIST Special Publication 1017-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, August 2007.
- [3] W. Gropp, E. Lusk, and A. Skjellum. Using MPI – Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2 edition, 1999.
- [4] Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. NUREG 1824, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2007.
- [5] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, and B.E. Poling. Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill, New York, 4th edition, 1987.
- [6] P.J. DiNenno, editor. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.
- [7] Pamela P. Walatka and Pieter G. Buning. PLOT3D User's Manual, version 3.5. NASA Technical Memorandum 101067, NASA, 1989.
- [8] G.W. Mulholland. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.
- [9] G.W. Mulholland and C. Croarkin. Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. Fire and Materials, 24:227–230, 2000.
- [10] M.L. Janssens and H.C. Tran. Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation. Journal of Fire Science, 10:528–555, 1992.
- [11] Y.P. He, A. Fernando, and M.C. Luo. Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment. Fire Safety Journal, 31:19–38, 1998.
- [12] S. Welsh and P. Rubini. Three-dimensional Simulation of a Fire-Resistance Furnace. In Fire Safety Science – Proceedings of the Fifth International Symposium. International Association for Fire Safety Science, 1997.
- [13] U. Wickstrom, D. Duthinh, and K.B. McGrattan. Adiabatic Surface Temperature for Calculating Heat Transfer to Fire Exposed Structures. In Proceedings of the Eleventh International Interflam Conference. Interscience Communications, London, 2007.
- [14] American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania. ASTM E 1355-04, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models, 2004.

- [15] W. Mell, K.B. McGrattan, and H. Baum. Numerical Simulation of Combustion in Fire Plumes. In Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, pages 1523–1530. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996.
- [16] K.B. McGrattan, H.R. Baum, and R.G. Rehm. Large Eddy Simulations of Smoke Movement. *Fire Safety Journal*, 30:161–178, 1998.
- [17] H.R. Baum, R.G. Rehm, P.D. Barnett, and D.M. Corley. Finite Difference Calculations of Buoyant Convection in an Enclosure, Part I: The Basic Algorithm. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, 4(1):117–135, March 1983.
- [18] H.R. Baum and R.G. Rehm. Finite Difference Solutions for Internal Waves in Enclosures. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, 5(4):958–977, December 1984.
- [19] H.R. Baum and R.G. Rehm. Calculations of Three Dimensional Buoyant Plumes in Enclosures. *Combustion Science and Technology*, 40:55–77, 1984.
- [20] R.G. Rehm, P.D. Barnett, H.R. Baum, and D.M. Corley. Finite Difference Calculations of Buoyant Convection in an Enclosure: Verification of the Nonlinear Algorithm. *Applied Numerical Mathematics*, 1:515–529, 1985.
- [21] R. Siegel and J. R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor & Francis, New York, 4<sup>th</sup> edition, 2002.
- [22] Y.B. Zel'dovich and Y.P. Raizer. *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. Dover Publications, New York, 2002. Translated from the Russian and then edited by W.D. Hayes and R.F. Probstein.
- [23] D. Drysdale. *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 2002.
- [24] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 2nd edition, 1959.
- [25] K.W. Childs. HEATING 7: Multidimensional, Finite-Difference Heat Conduction Analysis Code System. Technical Report PSR-199, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1998.
- [26] J.C. Adams, W.S. Brainerd, J.T. Martin, B.T. Smith, and J.L. Wagener. *Fortran 95 Handbook: Complete ISO/ANSI Reference*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997. 151
- [27] K.B. McGrattan, T. Kashiwagi, H.R. Baum, and S.L. Olson. Effects of Ignition and Wind on the Transition to Flame Spread in a Microgravity Environment. *Combustion and Flame*, 106:377–391, 1996.
- [28] T. Kashiwagi, K.B. McGrattan, S.L. Olson, O. Fujita, M. Kikuchi, and K. Ito. Effects of Slow Wind on Localized Radiative Ignition and Transition to Flame Spread in Microgravity. In Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, pages 1345–1352. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996.
- [29] W. Mell and T. Kashiwagi. Dimensional Effects on the Transition from Ignition to Flame Spread in Microgravity. In Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, pages 2635–2641. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1998. 155

- [30] W. Mell, S.L. Olson, and T. Kashiwagi. Flame Spread Along Free Edges of Thermally-Thin Samples in Microgravity. In Twenty-Eighth Symposium (International) on Combustion, pages 2843–2849. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 2000.
- [31] K. Prasad, Y. Nakamura, S.L. Olson, O. Fujita, K. Nishizawa, K. Ito, and T. Kashiwagi. Effect of Wind Velocity on Flame Spread in Microgravity. In Twenty-Ninth Symposium (International) on Combustion, pages 2553–2560. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 2002.
- [32] Y. Nakamura, T. Kashiwagi, K.B. McGrattan, and H.R. Baum. Enclosure Effects on Flame Spread over Solid Fuels in Microgravity. *Combustion and Flame*, 130:307–321, 2002.
- [33] W.E. Mell, K.B. McGrattan, and H.R. Baum. g-Jitter Effects on Spherical Diffusion Flames. *Microgravity Science and Technology*, 15(4):12–30, 2004.
- [34] A. Mukhopadhyay and I.K. Puri. An Assessment of Stretch Effects on Flame Tip Using the Thin Flame and Thick Formulations. *Combustion and Flame*, 133:499–502, 2003.
- [35] A. Hamins, M. Bundy, I.K. Puri, K.B. McGrattan, and W.C. Park. Suppression of Low Strain Rate Non-Premixed Flames by an Agent. In Proceedings of the 6th International Microgravity Combustion Workshop, NASA/CP-2001-210826, pages 101–104. National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, May 2001.
- [36] K.B. McGrattan, R.G. Rehm, and H.R. Baum. Fire-Driven Flows in Enclosures. *Journal of Computational Physics*, 110(2):285–291, 1994.
- [37] I.R. Thomas, K.A.M. Moinuddin, and I.D. Bennetts. The Effect of Fuel Quantity and Location on Small Enclosure Fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 17(2):85–102, May 2007.
- [38] K.B. McGrattan, B.W. Klein, S. Hostikka, and J.E. Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User’s Guide. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, October 2007.
- [39] P. Friday and F. W. Mowrer. Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, April 2001.
- [40] A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney, and A. Kashef. Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses. In 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality, pages 1–8, Ottawa, Ontario, Canada, December 2003. National Research Council, Canada.
- [41] R.L. Alpert. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Ceiling Jet Flows. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2003.
- [42] A. Bounagui, A. Kashef, and N. Benichou. Simulation of the Dynamics of the Fire for a Section of the L.H.-La Fontaine Tunnel. IRC-RR- 140, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, K1A0R, September 2003.
- [43] Y. Xin. Assessment of Fire Dynamics Simulation for Engineering Applications: Grid and Domain Size Effects. In Proceedings of the Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2004.

- [44] J.A. Ierardi and J.R. Barnett. A Quantitative Method for Calibrating CFD Model Calculations. In Proceedings of the CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings, pages 507–514. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), 2003.
- [45] G. Heskestad. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Fire Plumes, Flame Height and Air Entrainment. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.
- [46] N.M. Petterson. Assessing the feasibility of reducing the grid resolution in fds field modeling. Fire Engineering Research Report 2002/6, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 2002.
- [47] A. Musser, K. B. McGrattan, and J. Palmer. Evaluation of a Fast, Simplified Computational Fluid Dynamics Model for Solving Room Airflow Problems. NISTIR 6760, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, June 2001.
- [48] W. Zhang, A. Hamer, M. Klassen, D. Carpenter, and R. Roby. Turbulence Statistics in a Fire Room Model by Large Eddy Simulation. Fire Safety Journal, 37:721–752, 2002.
- [49] J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. Monthly Weather Review, 91(3):99–164, March 1963.
- [50] J.W. Deardorff. Numerical Investigation of Neutral and Unstable Planetary Boundary Layers. Journal of Atmospheric Sciences, 29:91–115, 1972.
- [51] M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W.H. Cabot. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. Physics of Fluids A, 3(7):1760–1765, 1991.
- [52] D.K. Lilly. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. Physics of Fluids A, 4(3):633–635, 1992.
- [53] J. Hietaniemi, S. Hostikka, and J. Vaari. FDS Simulation of Fire Spread – Comparison of Model Results with Experimental Data. VTT Working Paper 4, VTT Building and Transport, Espoo, Finland, 2004.
- [54] C. Lautenberger, G. Rein, and C. Fernandez-Pello. The application of a genetic algorithm to estimate the material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. Fire Safety Journal, 41:204–214, 2006.

## Алфавитный указатель

<p>2D Расчеты, 25</p> <p>Стратификация атмосферы, 48</p> <p>Аксиально-Симметричные расчеты, 25</p> <p>бароклинный момент силы, 33</p> <p>BNDF (Boundary file/Граничный файл), 99</p> <p>QUANTITY (Величина), 99</p> <p>границные условия, 43, 44</p> <p>граничный слой, 46</p> <p>CLIP, 35</p> <p>Выделение CO, 68</p> <p>Цвета, 63</p> <p>Элнменты управления, 90</p> <p>Создание и устранение препятствий, 87</p> <p>Список функции, 90</p> <p>Применение DEVC (Параметры устройства), 87</p> <p>CTRL (Параметры функции управления), 90</p> <p>DELAY (Задержка), 91</p> <p>FUNCTION_TYPE (Тип функции), 90</p> <p>ALL (Все), 91</p> <p>ANY (Любые), 91</p> <p>AT_LEAST (По меньшей мере), 91</p> <p>CUSTOM (Специальные), 92</p> <p>DEADBAND (Мертвая зона), 91</p> <p>KILL (Уничтожение процесса), 92</p> <p>ONLY (Только), 91</p> <p>RESTART (Перезапуск), 92</p> <p>TIME_DELAY (Задержка во времени), 91</p> <p>ID (Идентификатор), 90</p> <p>INITIAL_STATE (Исходное состояние), 91</p> <p>INPUT_ID (Идентификатор входа), 90</p> <p>LATCH (Триггер), 90</p> <p>N, 91</p> <p>ON_BOUND (На границе), 91</p> <p>RAMP_ID (ID линейного изменения), 92</p> <p>SETPOINT (Установка), 91</p> <p>TRANSPARENCY (Прозрачность), 39</p> <p>XВ, 39</p> <p>HRRPUA (Скорость тепловыделения на единицу площади), 44</p> <p>HVAC, 33, 90–92</p> <p>INIT (Начальные условия), 35</p> <p>нчальная температура твердого тела), 59</p> <p>Входной файл</p>	<p>DEVC (Устройство), 81</p> <p>BYPASS_FLOWRATE (Скорость обходного потока), 86</p> <p>DELAY (Задержка), 86</p> <p>FLOWRATE (Скорость потока), 86</p> <p>ID, 81</p> <p>IOR, 82</p> <p>ORIENTATION (Ориентация), 82</p> <p>PROP_ID, 81</p> <p>QUANTITY (Величина), 82</p> <p>XYZ, 81</p> <p>Устройство</p> <p>Лучевой датчик, 86</p> <p>Датчик аспирации, 86</p> <p>Тепловой датчик, 85</p> <p>Датчик дыма, 85</p> <p>Распыляющая форсунка, 84</p> <p>Спринклер, 82</p> <p>Загрузка, 7</p> <p>"сухотрубная" спринклерная система, 93</p> <p>DUMP, 95</p> <p>COLUMN_DUMP_LIMIT (предел колонок дампа), 82</p> <p>Вентилятор, 91</p> <p>fds2ascii, 106</p> <p>Техническая характеристика, 3</p> <p>Последние изменения, 4</p> <p>Fire from Heat Release Rate (Пожар от скорости выделения тепла), 44</p> <p>фиксированная температура поверхности, 45</p> <p>Подавление пламени, 68</p> <p>сила тяжести, 32</p> <p>HEAD, 23</p> <p>CHID, 23</p> <p>TITLE, 23</p> <p>HOLE, 39</p> <p>COLOR, 39</p> <p>CTRL_ID, 39, 131</p> <p>DEVC_ID, 39</p> <p>RGB, 39</p> <p>Список имен, 19</p>
---	---

<p>Общее представление, 19</p> <p>ISOF (ISOsurfaceFile/файл изоповерхности), 99</p> <p>Масштабное Моделирование вихрей, 33</p> <p>Жидкое топливо, 57</p> <p>Решетка, 47</p> <p>Массовый расход, 45</p> <p>Слой материала, 53</p> <p>MATL (Материал)0, 53</p> <p>A, 54</p> <p>ABSORPTION_COEFFICIENT (Коэффициент поглощения), 54</p> <p>BOILING_TEMPERATURE (Температура кипения), 58</p> <p>CONDUCTIVITY (Удельная теплопроводность), 54</p> <p>DENSITY (Плотность), 54</p> <p>E, 54</p> <p>EMISSIVITY (Коэффициент черноты), 54</p> <p>HEAT_OF_COMBUSTION (Теплота горения), 56</p> <p>HEAT_OF_REACTION (Теплота реакции), 56</p> <p>N_S, 54</p> <p>N_T, 56</p> <p>NU_FUEL, 54</p> <p>NU_RESIDUE, 54</p> <p>NU_WATER, 54</p> <p>REFERENCE_RATE (Репорная скорость), 55</p> <p>REFERENCE_TEMPERATURE (Репорная температура), 55</p> <p>RESIDUE (Остаток), 54</p> <p>SPECIFIC_HEAT (Удельная теплоемкость), 54</p> <p>THRESHOLD_TEMPERATURE (Пороговая температура), 56</p> <p>MB - Граница Сетки, 40</p> <p>MESH (Сетка), 25</p> <p>IJK, 25</p> <p>SYNCHRONIZE (Синхронизировать), 27</p> <p>XB, 25</p> <p>Размер сетки, 29</p> <p>MISC (Вспогательные параметры), 31</p> <p>GROUND_LEVEL (Уровень земли), 48</p> <p>RADIATION (Излучение), 72</p> <p>MLRPUA (Скорость потери в массе на единицу площади), 44</p> <p>эффекиmvность составных сеток, 27</p> <p>Сотавне сетки, 26</p>	<p>Таблица списка имен, 22</p> <p>Навье-Стокс, 3</p> <p>неплоские геометрии, 49</p> <p>OBST (Препятствие), 37</p> <p>CTRL_ID, 131</p> <p>PERMIT_HOLE (Разрешение на отверстие), 40</p> <p>пожары вне помещения, 48</p> <p>выходные данные, 95</p> <p>Температура адиабатической поверхности, 104</p> <p>Граничный файл, 99</p> <p>fds2ascii, 106</p> <p>Интегрированное измерение, 96</p> <p>Файл изоповерхности, 99</p> <p>Plot3D, 99</p> <p>Точечное измерение, 96</p> <p>Файл слоя, 98</p> <p>Дым и пожар, 100</p> <p>Статистика, 97</p> <p>Сводка величин, 107</p> <p>Выходные файлы</p> <p>.out, 12</p> <p>.stop, 12</p> <p>_devc.csv, 82</p> <p>_hrr.csv, 101</p> <p>PART, 73</p> <p>DROPLETS_PER_SECOND (количество капель в секунду), 74</p> <p>Poisson initialization (Пуассоновская инициализация), 15</p> <p>POROUS_FLOOR (Водопроницаемый пол) выходные данные, 104</p> <p>спринклерная система предварительного действия, 93</p> <p>понижение давления, 50</p> <p>PROF, 98</p> <p>IOR, 98</p> <p>QUANTITY, 98</p> <p>XYZ, 98</p> <p>PROP, 82</p> <p>Модели пиролиза, 54</p> <p>RADI, 71</p> <p>ANGLE_INCRMENT (Приращение угла), 72</p> <p>CH4_BANDS, 72</p> <p>NMIEANG (Количество углов), 72</p>
--	---

<p>WIDE_BAND_MODEL (Широкополосная Модель), 72</p> <p>радиальное распространение огня, 48</p> <p>RAMP (Линейное изменение), 60</p> <p>REAC (Параметры реакции), 65</p> <p>Перезапуск, 32</p> <p>Запуск FDS, 9</p> <p>Parallel (Параллельная версия), 10</p> <p>LAM-MPI, 11</p> <p>MPICH2, 11</p> <p>Serial (серийная версия), 9</p> <p>Sawtooth (Зубчатость), 38</p> <p>SLCF (Параметры послойного файла), 98</p> <p>PBX,PBY,PBZ, 98</p> <p>VECTOR (Вектор), 98</p> <p>Наклонные Потолки, 38</p> <p>Твердое Топливо, 54</p> <p>SPEC (Параметры веществ), 69</p> <p>спринклер</p> <p>Форма распыла, 84</p> <p>спринкле, 82, 91</p> <p>Тушение Спринклером, 78</p> <p>эффект тяги, 33, 35</p> <p>Поддержка, 13</p> <p>Сообщения об ошибках, 14</p> <p>Нехватка Ресурсов, 14</p> <p>Входной Файл, 14</p> <p>Неустойчивость численного решения, 14</p> <p>Пуассоновское уравнение, 15</p> <p>Выполнение программы, 15</p> <p>Issue Reporting, (Сообщение результатов) 15</p> <p>Номер Версии, 13</p> <p>SURF (Поверхность), 44</p> <p>ADIABATIC (Адиабатическая), 44, 45</p> <p>BACKING (Задняя), 45</p> <p>BURN_AWAY (Выгорание), 58</p> <p>CELL_SIZE_FACTOR (коэффициент размера ячейки), 59</p> <p>COLOR (Цвет), 63</p> <p>CONVECTIVE_HEAT_FLUX (конвективный тепловой поток), 45</p> <p>DUCT_PATH (Канал), 52</p> <p>E_COEFFICIENT (Коэффициент затухания), 78</p> <p>EMISSIVITY (Коэффициент черноты), 45</p> <p>EXTERNAL_FLUX (Внешний поток), 167</p> <p>GEOMETRY (Геометрия), 49</p>	<p>NUMBER_RADIATION_ANGLES (Количество углов излучения), 72</p> <p>RADIATIVE_FRACTION (Доля излучения), 71</p> <p>RADTMP, 72</p> <p>TIME_STEP_INCREMENT (Приращение шага по времени), 72</p> <p>LEAK_PATH (Путь утечки), 50</p> <p>MASS_FLUX (Поток массы), 47</p> <p>MASS_FLUX_TOTAL (Общий поток массы), 46</p> <p>MASS_FRACTION (Массовая доля), 47, 61</p> <p>MATL_ID (Идентификатор материала), 53</p> <p>MATL_MASS_FRACTION (Массовая доля материала), 53</p> <p>MAX_PRESSURE (Максимальное давление), 51</p> <p>NPPC, 74</p> <p>PART_ID, 74</p> <p>PARTICLE_MASS_FLUX (Поток массы частицы), 74</p> <p>PLE, 48</p> <p>POROUS (Водопроницаемый), 47, 52</p> <p>PROFILE (Профиль), 48</p> <p>RAMP_MF, 61</p> <p>RAMP_Q, 48, 56, 60</p> <p>RAMP_T, 60</p> <p>RAMP_V, 60</p> <p>RGB, 63</p> <p>SHRINK (Сжатие), 59</p> <p>SLIP_FACTOR (Коэффициент скольжения), 46</p> <p>STRETCH_FACTOR (Коэффициент растяжения), 59</p> <p>TAU_MF, 61</p> <p>TEXTURE_HEIGHT (Высота текстуры), 63</p> <p>TEXTURE_MAP, 63</p> <p>TEXTURE_WIDTH (Ширина тестуры), 63</p> <p>THICKNESS (Толщина), 53</p> <p>THICKNESS (Толщина), 44</p> <p>TMP_BACK (Температура задней поверхности), 59</p> <p>TMP_FRONT (температура передней поверхности), 45</p> <p>TMP_INNER (Начальная температура), 59</p> <p>VEL (Скорость), 45</p> <p>VOLUME_FLUX (Массовый поток), 45</p> <p>Z0, 48</p> <p>Surface Texture Maps(Наложение текстуры поверхности), 63</p> <p>Системные требования</p> <p>Аппаратное оборудование, 7</p>
--	---



<p>HEAT_OF_VAPORIZATION (Теплота испарения), 56</p> <p>HRRPUA (Скорость тепловыделения на единицу площади), 48, 56</p> <p>IGNITION_TEMPERATURE (Теплота возгорания), 56</p> <p>WALL_INCREMENT (Увеличение стены), 59, 167</p> <p>TRNX,TRNY,TRNZ, 25, 28</p> <p>CC (Вычислительная координата), 29</p> <p>PC (Физическая координата), 29</p> <p>Troubleshooting (Устранение неполадок)</p> <p>VENT Orientation (Ориентация вентиляционного отверстия), 42</p> <p>VENT (Вентиляционное отверстие), 40</p> <p>CTRL_ID, 131</p> <p>Volume Flux (Объемный поток), 45</p> <p>ZONE (Зона), 50</p>	<p>MPI, 8</p> <p>Операционная система, 8</p> <p>TABL, 60</p> <p>TAIL, 20</p> <p>тангенциальная скорость, 46</p> <p>термостат, 91</p> <p>TIME (Время), 23</p> <p>DT, 24</p> <p>SYNCHRONIZE (Синхронизировать), 24, 27</p> <p>T_BEGIN, 23</p> <p>T_END, 23</p>
--	--