

Численное моделирование пожара с помощью

# FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Е. С. Маркус, А.Ю. Снегирёв, Е.А. Кузнецов



Санкт-Петербург

Издательство Политехнического университета

2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

*E.C. Маркус, А.Ю. Снегирёв, Е.А. Кузнецов*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА  
С ПОМОЩЬЮ  
**FIRE DYNAMICS SIMULATOR**

*Учебное пособие*

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе  
высшего образования по укрупненным группам специальностей и  
направлений подготовки 15.00.00 «Машиностроение» в качестве учебного  
пособия для реализации основных образовательных программ по направлению  
подготовки бакалавров  
15.03.03 «Прикладная механика»



Санкт-Петербург  
2021

УДК 614.841.1, 536.46 (075.8)

C53

Рецензенты:

Доктор техн. наук, профессор, председатель совета директоров Группы компаний «Гефест», зав. каф. «Пожарная безопасность» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *Л. Т. Танклевский*

Доктор техн. наук, профессор Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России *А. А. Таранцев*

Канд. техн. наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

*M. B. Гравит*

**Маркус Е. С.** Численное моделирование пожара с помощью Fire Dynamics Simulator: учеб. пособие / Е. С. Маркус, А. Ю. Снегирев, Е. А. Кузнецов – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2021. – 173 с.

Учебное пособие содержит разделы учебных дисциплин «Исследовательские проекты в области механики сплошных сред», «Физика горения и взрыва» и «Теория горения» бакалаврских и магистерских программ Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Института прикладной математики и вычислительной физики СПбПУ. Цель данного издания – помочь в практическом освоении расчётного кода Fire Dynamics Simulator (FDS), получившего широкое распространение в инженерной практике и предназначенного для прогнозирования развития пожаров в помещениях и в открытом пространстве. Обучение предусматривает выполнение трех расчётных заданий и проектной работы. Описание практических заданий сопровождается кратким изложением теоретических основ соответствующей области теплофизики пожара: нестационарной теплопроводности в твердом теле, диффузионного горения в условиях турбулентной естественной конвекции в неограниченном пространстве и в помещении с проемом. Читатель знакомится с режимами пожара в помещении и осваивает приближенные аналитические методы расчёта газообмена через проемы и температуры продуктов сгорания. Дано определение опасных факторов пожара, приведены их предельные значения и рассмотрена концепция проектного пожара. Приведен пример проектного пожара и расчета времени блокирования путей эвакуации. Пособие содержит значительное количество справочных данных.

Предназначено для студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, профессиональная деятельность которых связана с задачами пожарной безопасности.

Табл. 28. Ил. 46. Библиогр.: 57 наим.

Печатается по решению Совета по издательской деятельности Ученого совета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Маркус Е.С., Снегирёв А.Ю., Кузнецов Е.А., 2021

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2021

© Автономная некоммерческая организация  
«ПожароВзрывоБезопасность», 2021

© Обложка: Котоманова А.Г., 2021

**ISBN XXX-X-XXXX-XXXX-X**

## Содержание

Введение .....	11
1. Основы работы с FDS.....	15
1.1. Краткое описание модели и расчётного кода .....	15
1.2. Перед началом работы .....	17
1.2.1. Необходимое программное обеспечение .....	17
1.2.2. Установка FDS на компьютер .....	17
1.2.3. Системные и аппаратные требования .....	19
1.2.4. Параллельные многопроцессорные вычисления .....	19
1.2.5. Дополнительные программы.....	20
1.2.6. Устранение проблем и поддержка пользователей .....	21
1.2.7. Вспомогательные материалы .....	21
1.3. Практическая работа с FDS .....	21
1.3.1. Группы параметров FDS .....	21
1.3.2. Пример fds-файла .....	23
1.3.3. Запуск расчета в однопроцессорном режиме .....	27
1.3.4. Визуализация результатов расчетов в Smokeview .....	29
1.3.5. Запуск расчета многопроцессорном режиме .....	31
1.3.6. Завершение и продолжение расчета .....	36
2. Нестационарная теплопроводность в плоском слое .....	38
2.1. Постановка задачи .....	39
2.2. Аналитическое решение .....	39
2.2.1. Термически толстый слой.....	43
2.2.2. Термически тонкий слой.....	45
2.2.3. Нагрев пластины при заданном тепловом потоке на поверхности.	
Тепловая теория воспламенения.....	47
2.3. Применение FDS.....	51
2.4. Порядок выполнения задания .....	61
2.5. Пример расчета .....	61
3. Турбулентное пламя в неограниченном пространстве.....	65
3.1. Постановка задачи .....	65
3.2. Турбулентное диффузионное пламя.....	65
3.3. Применение FDS.....	75

3.3.1. Эмиссия, перенос и поглощение теплового излучения.....	75
3.3.2. Расчетная область и расчётная сетка.....	77
3.3.3. Подготовка fds-файла.....	79
3.4. Порядок выполнения задания .....	84
3.5. Пример расчета .....	85
<b>4. Турбулентное пламя в помещении с проемом .....</b>	<b>90</b>
4.1. Постановка задачи .....	92
4.2. Теоретический анализ .....	95
4.2.1. Газообмен через проём .....	95
4.2.2. Температура горячего слоя.....	100
4.3. Применение FDS.....	107
4.3.1. Расчетная область и расчетная сетка.....	107
4.3.2. Подготовка fds-файла.....	108
4.4. Порядок выполнения задания .....	116
4.5. Пример расчета .....	117
<b>5. Моделирование пожара в помещении .....</b>	<b>122</b>
5.1. Опасные факторы пожара.....	122
5.2. Проектный пожар .....	123
5.2.1. Мощность тепловыделения .....	126
5.2.2. Образование сажи и угарного газа .....	132
5.2.3. Дальность видимости .....	134
5.3. Применение FDS.....	135
5.4. Порядок выполнения задания .....	139
5.5. Проектный пожар в помещениях вычислительного центра .....	140
5.5.1. Описание сценариев пожара .....	143
5.5.2. Результаты расчетов.....	144
<b>Библиографический список .....</b>	<b>150</b>
<b>Список обозначений .....</b>	<b>6</b>
<b>Приложения .....</b>	<b>154</b>
<b>П1. Математическая модель FDS .....</b>	<b>154</b>
П1.1. Модель газовой фазы.....	154
П1.1.1. Моделирование турбулентного течения .....	156
П1.1.2. Уравнение переноса энталпии.....	157

П1.1.3. Поле скорости и давления .....	158
П1.1.4. Модель турбулентного горения .....	160
П1.1.5. Моделирование теплового излучения .....	162
П1.2. Модель твёрдой фазы.....	166
П1.2.1. Теплопередача в слое твердого материала .....	166
П1.2.3. Моделирование пожарной нагрузки.....	167
П2. Интернет-ресурсы.....	168

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

### *Латинские символы*

$a$	температуропроводность, м <sup>2</sup> /с
$A$	площадь поверхности, м <sup>2</sup>
$A_o$	площадь проема, м <sup>2</sup>
$A_T$	полная площадь поверхности стен и перекрытий, м <sup>2</sup>
$Bi$	число Био
$c_s$	теплоемкость твердого материала, Дж/(кг·К)
$c_p$	теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К)
$C_d$	коэффициент расхода отверстия
$\mathcal{D}$	коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с
$D$	характерный размер (диаметр) очага, м
$D^*$	вертикальный пространственный масштаб турбулентного естественно-конвективного пламени, м
$f$	частота колебаний, Гц
$f_c$	полнота сгорания
$f_r$	доля излученной энергии
Fo	число Фурье
Fr	число Фруда
$g$	ускорение свободного падения 9.81 м/с <sup>2</sup>
$G$	интенсивность проходящего излучения со всех направлений, Вт/м <sup>2</sup>
Gr	число Грасгофа
$h$	высота, м
$h_{in}, h_{out}$	высоты участков проема ниже и выше нейтральной плоскости, м
$h_*$	расстояние от нижней кромки проема нижней границы припотолочного слоя, м
$H$	высота проема, м
$h_f^0$	стандартная энталпия образования, Дж/кг
$h_T$	тепловая энталпия, Дж/кг
$I$	интенсивность теплового излучения,
$k_{sgs}$	подсеточная кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
$L_f$	длина пламени, м

$L_{vis}$	дальность видимости, м
$m$	масса, кг
$m_{in}$	масса газа в помещении, кг
$\dot{m}$	массовый расход, кг/с
$\dot{m}_{air}$	массовые расход воздуха, входящего в проем ( $\dot{m}_{air} = G_{in}$ ), кг/с
$\dot{m}_g$	массовый расход газа, выходящего через проем ( $\dot{m}_g = G_{out}$ ), кг/с
$m''$	удельный массовый расход горючего (скорость выгорания), кг/(м <sup>2</sup> ·с)
$m''_\infty$	скорость выгорания, очаг больших размеров, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
$m'''$	объемный источник массы, кг/(м <sup>3</sup> ·с)
$M$	молярная масса, кг/моль
Ma	число Маха
Nu	число Нуссельта
$P$	давление, Па
$p$	динамическое давление, Па
Pr	число Прандтля
$q''$	объемная мощность тепловыделения, Вт/м <sup>3</sup>
$q''_{ext}$	падающий радиационный поток, Вт/м <sup>2</sup>
$q''_{net}$	результатирующий тепловой поток, поступающий в слой твердого материала, Вт/м <sup>2</sup>
$q''_r$	радиационный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>
$S$	тензор скоростей сдвиговых деформаций, с <sup>-1</sup>
Sc	число Шмидта
$\dot{Q}$	мощность тепловыделения, Вт
$Q''$	удельная мощность тепловыделения, Вт/м <sup>2</sup>
$Q^*$	безразмерная мощность тепловыделения
$t$	время, с
$t_i$	длительность промежутка времени, по истечении которого достигается мощность тепловыделения 1 МВт, с
$T$	температура, К
$u, v, w$	компоненты вектора скорости, м/с
$V_{fuel}$	скорость истечения горючего газа, м/с
$V_0$	скорость расширения очага, м/с

$W$	ширина проема, м
$x, y, z$	пространственные координаты, м
$y_{\text{C}}, y_{\text{CO}}$	выход сажи, угарного газа
$Y_{\text{O}_2, \text{air}}$	массовая доля кислорода в воздухе
$\tilde{Z}_{\alpha}$	массовые доли обобщенных компонентов

### *Греческие символы*

$\alpha$	коэффициент теплоотдачи Вт/(м <sup>2</sup> ·К); коэффициент скорости роста мощности пожара, кВт/с <sup>2</sup>
$\delta$	толщина слоя, м
$\delta_{i,j}$	символ Кронекера
$\Delta h_c$	низшая теплота сгорания, Дж/кг горючего
$\Delta h_{c,\text{O}_2}$	теплота сгорания, Дж/кг О <sub>2</sub>
$\Delta h_{\text{vap}}^0$	теплота испарения, Дж/кг
$\Delta Q$	тепловыделение, Дж
$\Delta t$	шаг по времени
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	шаги по координате
$\epsilon$	степень черноты
$\kappa$	коэффициент поглощения, м <sup>-1</sup>
$\lambda$	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
$\mu_{sgs}$	подсеточная вязкость, Па·с
$\mu_n$	собственное число
$\Pi$	периметр, м
$\rho$	плотность, кг/м <sup>3</sup>
$\rho_{\text{soot}}$	парциальная плотность сажи в газовом потоке, кг/м <sup>3</sup>
$\sigma$	постоянная Стефана-Больцмана
$\theta$	безразмерная температура
$\tau_{i,j}$	компоненты тензора касательных напряжений, Па
$\tau_{ign}$	время задержки воспламенения
$\tau_{rel}$	время релаксации температурного поля

### *Нижние индексы*

<i>b</i>	абсолютно черное тело
<i>c</i>	конвективный
<i>ch</i>	химический
<i>cr</i>	критический
<i>d</i>	капли, дисперсные частицы
<i>ext</i>	внешний
<i>i j k</i>	пространственные координаты
<i>f</i>	пламя
<i>fuel</i>	горючее
<i>g</i>	газ, продукты сгорания
<i>ign</i>	воспламенение
<i>in</i>	внутренний, входящий
<i>net</i>	результатирующий
<i>O</i>	проем
<i>out</i>	наружный. выходящий
<i>r</i>	радиационный
<i>rel</i>	релаксация
<i>s</i>	твердое тело
<i>sgs</i>	подсеточный
<i>soot</i>	сажа
<i>t</i>	турбулентный
<i>tr</i>	переходный
<i>TC</i>	термопара
<i>vap</i>	испарение
<i>W</i>	стена
$\lambda$	длина волны
0	начальное значение, окружающая среда
$\infty$	окружающая среда

### *Верхние индексы*

0	стандартное состояние (298 К, 1 атм)
<i>sgs</i>	подсеточный
$-$	осреднение по Рейнольдсу
$\sim$	осреднение по Фавру

## *Аббревиатуры*

ОФП	опасные факторы пожара
ПРВ	пожар, регулируемый вентиляцией
ПРН	пожар, регулируемый нагрузкой

CPU	central processing unit
DNS	direct numerical simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
HRRPUA	heat release rate per unit area
LES	large eddy simulation
MPI	message passing interface
NFPA	national fire protection association
NIST	National Institute of Standards and Technology
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
TVD	total variation diminishing
WALE	wall-adapting local eddy-viscosity

## **ВВЕДЕНИЕ**

Пожар – сложное физико-химическое явление, для описания которого используются результаты современной науки о горении, механики жидкости и газа, теории теплообмена. Прогноз развития пожара необходим для выполнения количественной оценки рисков и возможного ущерба, оценки эффективности систем обнаружения и тушения пожара, проектирования путей эвакуации людей. Анализ возможных сценариев развития пожара применяется при расследовании аварий и катастроф.

Численное моделирование с использованием методов вычислительной гидродинамики представляет наиболее информативную технологию прогнозирования динамики пожара. В последние десятилетия накоплен значительный опыт численного моделирования динамики пожара и его применения в инженерной практике. В связи с этим становится актуальной задача подготовки квалифицированных специалистов, которые владеют теоретическими основами горения и тепломассообмена при пожаре и, кроме того, способны эффективно использовать современное программное обеспечение.

Данное пособие содержит компоненты учебных дисциплин «Исследовательские проекты в области механики сплошных сред», «Физика горения и взрыва» и «Теория горения» бакалаврских и магистерских программ кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» и Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Института прикладной математики и вычислительной физики СПбПУ. Основная цель данного учебного пособия – практическое освоение расчётного кода Fire Dynamics Simulator (FDS), получившего широкое распространение в инженерной практике и предназначенного для прогнозирования развития пожаров в помещениях и в открытом пространстве. Освоение основных возможностей предусматривает выполнение трех расчётных заданий и проектной работы. Описание теоретических заданий сопровождается кратким изложением теоретических основ соответствующей области теплофизики пожара: нестационарной теплопроводности в твердом теле, диффузионного горения в условиях турбулентной естественной-конвекции в неограниченном пространстве и в помещении с проемом. В результате читатель знакомится с режимами пожара в помещении и осваивает приближенные аналитические методы расчёта газообмена через проемы и температуры продуктов сгорания.

В пособии содержится описание основного подхода, применяемого в современной инженерной практике численного моделирования пожаров. Данный подход опирается на концепции опасных факторов пожара (ОФП) и проектного пожара. Опасные факторы пожара определяются как теплофизические параметры создаваемой пожаром среды, достижение которыми своих предельных значений требует от инженеров и проектировщиков принятия решений, нацеленных на обеспечение пожарной безопасности объекта. Концепция проектного пожара предусматривает задание характеристик очага пожара, для которых выполняется прогноз горения в газовой фазе, переноса дыма и газообразных продуктов сгорания, а также теплового воздействия на конструкции. В пособии разобраны примеры расчётов для каждого из расчётных заданий и приведён пример прогнозирования опасных факторов пожара в здании с последующей оценкой времени блокирования путей эвакуации.

Основной текст пособия состоит из пяти глав. Первая глава содержит инструкции по практической работе с расчетным кодом FDS, причем особое внимание уделено параллельным вычислениям на многопроцессорных кластерах. Следующие три главы предназначены для выполнения трех расчетных заданий.

Первое задание нацелено на расчет нестационарного поля температуры в плоском слое твердого материала. Задача данного типа важна для прогноза огнестойкости негорючих конструкций, расчета теплопотерь в конструкции (от которых зависит температурный режим пожара), а также для определения времени задержки воспламенения твердых горючих материалов. В связи с этим приведены аналитические решения, необходимые для инженерной практики. При выполнении данного задания пользователь получает первичный опыт работы с FDS и знакомится с принципами численного расчета теплообмена в конструкциях.

Во втором задании рассматривается турбулентное естественно-конвективное пламя над локальным очагом пожара. Описание данного режима горения включает в себя классификацию разных видов пламени, эмпирические данные об их длине, структуре и нестационарной динамике, а также метод приближенного расчета радиационных тепловых потоков, падающих на удаленные объекты. Выполнение данного задания знакомит пользователя с методикой расчета газофазного пламени.

В рамках третьего задания выполняется расчет полей температуры и ско-

ности газа при горении над локальным очагом пожара в помещении с вертикальным проемом. Это типовой сценарий проектного пожара в помещении, с которым сталкиваются расчетчики в своей практической деятельности. В расчетном задании рассматриваются условия полномасштабных экспериментов, в которых измерены профили температуры и скорости газа при разных положениях и мощностях очага, а также для разной формы и размеров проема. Таким образом, в данном задании рассматривается как газофазное пламя и создаваемый им турбулентных поток продуктов сгорания, так и сопряженный теплообмен с конструкциями.

Во всех расчетных заданиях требуется выполнить многовариантные вычисления, чтобы оценить чувствительность результатов расчетов к сеточному разрешению и сравнить их с приближенными аналитическими и эмпирическими формулами.

В последней (пятой) главе дано определение опасных факторов пожара, приведены их предельные значения и обсуждена концепция проектного пожара. Специфика прогнозирования динамики пожара заключается в том, что не существует точной и универсальной методики задания проектного пожара. Поэтому выбор рассматриваемых сценариев определяется экспертным путём на основе существующего опыта и всей доступной информации об объекте. Это порождает значительную неопределенность в выборе наиболее опасных и наиболее вероятных сценариев, разрешение которой находится за пределами возможностей и задач численного моделирования. С учетом этой специфики пользователю предлагается самостоятельно выбрать объект, поставить задачу, выполнить расчет и проанализировать результаты. В качестве примера приведён расчет времени блокирования путей эвакуации при двух сценариях пожара в здании.

С учетом цели данного учебного пособия в тексте дано лишь краткое описание используемых в расчетном коде математических моделей и только тех из них, которые активируются при выполнении расчетных заданий. Это описание приведено в приложениях, которые также содержат ссылки на полезные интернет-ресурсы. Пособие содержит значительное количество справочных данных о свойствах пожарной нагрузки.

Широкое распространение FDS сопровождается непрерывной апробацией модели и верификацией расчетного кода. Результаты этой деятельности

публикуются в профессиональных изданиях и стимулируют как усовершенствование существующих компонентов, так и внедрение новых. Настоящее пособие разработано для версии FDS 6.7. Поскольку программное обеспечение FDS непрерывно обновляется, целесообразно использовать его актуальную версию. Отметим, что изменения и советы по обратной совместимости с устаревшими версиями приводятся в специальном разделе руководства пользователя.

Авторы признательны рецензентам (профессору Л.Т. Танклевскому, профессору А.А. Таранцеву и доценту М.В. Гравит) за внимательное рассмотрение рукописи, студентам бакалаврских и магистерских программ ВШ ПМиВФ, терпеливо выполнившим задания по мере формирования данной учебной дисциплины. Авторы выражают благодарность разработчикам FDS (Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vanella) за их поддержку на постоянно действующем дискуссионном форуме, обсуждение докладов авторов данного пособия на международных научных конференциях, а также за лекции, прочитанные разработчиками FDS на Второй летней школе по численному моделированию динамики пожаров<sup>1</sup>.

При подготовке данного пособия использованы вычислительные ресурсы Суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ. Издание подготовлено при поддержке Автономной некоммерческой организации «ПожароВзрывоБезопасность» (г. Санкт-Петербург).

---

<sup>1</sup> 2nd Summer School on Fire Dynamics Modelling, Forschungszentrum Jülich (Germany), Institute for Advanced Simulation / Civil Safety Research, 13-17 May 2019.

# 1. ОСНОВЫ РАБОТЫ С FDS

## 1.1. Краткое описание модели и расчётного кода

Математическая модель и расчётный код Fire Dynamics Simulator (FDS) разработаны в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST). FDS – свободно распространяемое и постоянно развивающееся программное обеспечение. С момента появления первых версий в начале 2000х годов FDS широко используется инженерами и учеными, работающими в области пожарной безопасности. В настоящее время FDS широко применяется как для решения практических задач (прогноз опасных факторов пожара, проектирование систем обнаружения и тушения пожаров, систем дымоудаления, планирование эвакуации, оценка огнестойкости конструкций, определение безопасных расстояний, расследование пожаров и др.), так и в научных исследованиях.

Основу FDS составляет гидродинамический решатель, предназначенный для численного решения уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учётом горения, радиационного теплообмена, наличия дисперсной фазы и сопряжённого теплообмена с конструкциями и пожарной нагрузкой. В состав FDS также входят компоненты, обеспечивающие расчёт эмиссии, переноса и поглощения теплового излучения; формирования, движения и испарения газокапельных потоков, создаваемых спринклерными оросителями; прогрева и термического разложения твёрдых горючих материалов; испарения горючих жидкостей; активации пожарных извещателей и спринклерных оросителей; работы систем вентиляции и кондиционирования. Визуализация результатов расчётов выполняется с помощью специальной программы Smokeview.

Гидродинамический решатель FDS и связанные с ним компоненты будем обозначать как *модель газовой фазы*. Важная особенность гидродинамического решателя FDS заключается в том, что он использует достаточно быстрый численный алгоритм, который, однако, предназначен только для существенно дозвуковых течений газа и не может применяться для расчёта высокоскоростных течений и детонации.

В большинстве практических расчётов горения при пожаре рассматривают турбулентное диффузионное пламя. Для расчета турбулентного течения в FDS используется метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) [15].

Если же рассматривается ламинарное течение, то его расчёт выполняется методом прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS) с разрешением всех пространственных масштабов. Как правило, газофазное горение описывается глобальной одностадийной необратимой реакцией окисления горючего. При этом предполагается, что скорость расходования реагентов в турбулентном пламени определяется не химической реакцией (ее скорость полагается бесконечно большой), а более медленным смешением реагентов. Время подсеточного смешения реагентов описывается моделью диссипации вихрей (Eddy Dissipation Model) [16]. Для моделирования ламинарного пламени предусмотрена возможность учёта одновременного протекания нескольких реакций с конечной скоростью. Для решения уравнения переноса теплового излучения применяется метод конечных объемов (вариант метода дискретных ординат), в котором рассчитывается интенсивность переноса энергии излучения в дискретных направлениях (их должно быть достаточно много) для каждой ячейки сетки. Расчёт эмиссии и поглощения энергии теплового излучения требует определения коэффициента поглощения продуктов сгорания (сажи, паров воды и углекислого газа), которые вычисляются по локальным значениям температуры и концентрации компонентов.

Для расчёта теплопередачи в конструкции (стены, перекрытия, элементы строительных конструкций, горючие материалы) применяется модель *твёрдой фазы*. В FDS предусмотрена возможность расчёта теплопроводности в твёрдой фазе с учётом сопряжения температур и тепловых потоков на поверхности раздела твёрдой и газовой фаз. В большинстве случаев достаточно рассматривать теплопроводность только по нормали к поверхности, но в последних версиях FDS также появилась возможность решения трёхмерного уравнения теплопроводности в твёрдых материалах. Для твёрдых горючих материалов предусмотрена активация модели пиролиза (термического разложения с образованием горючего газа). Возможен учёт частичной прозрачности материала для теплового излучения.

Для расчёта формирования, движения и испарения газокапельных или газодисперсных потоков, создаваемых спринклерными оросителями или системами порошкового пожаротушения, применяется лагранжев подход [17]. При этом выполняется расчёт движения, нагрева и испарения большого количества

дискретных частиц (капель), взаимодействующих с газовым потоком. Соответствующие компоненты модели и численные алгоритмы формируют *модель дискретной фазы FDS*.

Расчеты выполняются на многоблочных декартовых сетках. Это значит, что для создания геометрии можно использовать только элементы с прямоугольным сечением. В последних версиях возможно создание более сложных элементов, но эта функция ещё находится в стадии тестирования. Для ускорения расчета на многопроцессорных кластерах используются две технологии параллелизации: Open MP и MPI.

## **1.2. Перед началом работы**

### **1.2.1. Необходимое программное обеспечение**

Программа FDS не имеет графической оболочки. Это значит, что она управляется не нажатием кнопок, а перечислением необходимых параметров в текстовом файле с расширением `fds`. Запуск расчета осуществляется через командную строку. FDS считывает файл `*.fds`, выполняет вычисления и записывает запрошенные выходные данные в файлы разных форматов. Программы, которые понадобятся при выполнении заданий в данном учебном пособии, перечислены в табл. 1.

### **1.2.2. Установка FDS на компьютер**

Исполняемые файлы, инструкции по установке, документация, и исходный код FDS доступны по ссылке

<https://pages.nist.gov/fds-smv/>,

где представлены версии FDS для MS Windows, Linux и Mac OS X. Рекомендуем выполнять установку с параметрами по умолчанию. Как правило, никаких дополнительных действий предпринимать не нужно.

Если все же возникла проблема с несовместимостью библиотек, то можно скачать эти библиотеки из сети Интернет или загрузить исходный код программы и скомпилировать ее самостоятельно (см. [52], с. 331).

Обычно установленные файлы пользователи MS Windows могут найти в папке: `C:\Program Files\Firemodels`.

*Таблица 1*

**Программное обеспечение, необходимое для работы с FDS**

	Минимальный набор	Рекомендованный набор	Дополнительно
Постановка задачи	Любой текстовый редактор	Notepad ++, Sublime или Vim	
Выполнение расчетов	FDS 6.7.*	FDS 6.7.*	PyroSim или BlenderFDS
Представление результатов	MS Excel или аналог	MS Excel или аналог Techplot или аналог	
Оформление отчета	MS Word или аналог	MS Word или аналог	

*Таблица 2*

**Системные и аппаратные требования**

Параметр	Требование
Тип операционной системы	MS Windows, Linux, Mac OS X 64-бита
Версия операционной системы	Не менее MS Window 7, Mac OS X 10.4.x
Характеристика процессоров (CPUs) <sup>2</sup>	Не менее 2 быстродействующих CPU
Оперативная память (RAM) <sup>3</sup>	Не менее 2-4 Гб на каждом ядре
Рекомендованный объем свободного места для хранения результатов расчетов	Не менее 10 Гб
Наличие видеокарты	Желательно для стабильной работы Smokeview

<sup>2</sup> Значение CPU определяет скорость выполнения расчета. В зависимости от используемой расчетной сетки выполнение заданий может занимать несколько десятков часов.

<sup>3</sup> Чем больше RAM, тем большее число ячеек вычислительной сетки может быть обработано одним ядром.

### **1.2.3. Системные и аппаратные требования**

Минимальные системные и аппаратные требования для установки FDS перечислены в табл. 2. Подчеркнем, что выполнение численных расчетов динамики развития пожара требует значительных вычислительных затрат, поэтому рекомендуется использовать достаточно мощный компьютер. Полный список системных и аппаратных требований, а также советы по организации распределённой вычислительной сети с использованием нескольких компьютеров имеются в руководстве пользователя [55].

### **1.2.4. Параллельные многопроцессорные вычисления**

FDS можно запустить на одном компьютере с использованием нескольких процессоров или использовать сеть из нескольких компьютеров (это позволит ускорить расчет). Перед запуском задачи необходимо проверить аппаратное обеспечение компьютера, чтобы знать доступный объем вычислительных ресурсов.

Пользователи MS Windows могут проверить это на вкладке «Производительность» Диспетчера задач, где будет приведено количество доступных сокетов, ядер и логических процессоров. Сокет (socket) обеспечивает обмен данными между процессами, то есть является центральным процессором (central processing unit, CPU). Каждый CPU управляет несколькими ядрами (cores). На каждом ядре можно запустить несколько потоков соответственно количеству логических процессоров (logical processors). Запуская FDS в параллельном режиме, нужно убедиться, что произведение заданных MPI-процессов и OpenMP-потоков не превышает количество доступных логических процессоров.

Пользователи Linux могут проверить доступные ресурсы используя команду “lscpu”, а пользователи Mac OS X – “sysctl hw”. В зависимости от версии операционной системы терминология может несколько отличаться.

Зная объем вычислительных ресурсов, можно выбрать оптимальный режим расчетов. Эффективность параллелизации в значительной степени зависит от конфигураций системы, архитектуры сети компьютеров и других факторов. При выполнении больших расчетов рекомендуется проводить исследование эффективности параллелизации отдельно для каждого сценария. Инструкции по запуску FDS в параллельном режиме приводятся ниже в разделе 1.3.5.

## **1.2.5. Дополнительные программы**

### *Текстовые редакторы*

Чтобы создавать fds-файлы и вносить в них изменения, необходимо использовать текстовый редактор. Помимо стандартных редакторов, предустановленных в любой системе (например Блокнот в MS Windows), можно использовать более функциональные приложения, например Sublime Text, Notepad++ или Vim. В этих редакторах есть подсветка синтаксиса, которая позволит визуально выделить параметры расчета и быстрее заметить возможные опечатки. FDS не сможет запустить расчет, если fds-файл содержит опечатку. Инструкции по настройке указанных текстовых редакторов доступны по ссылкам, приведенным в приложении П2. При подготовке этого пособия мы использовали Notepad++.

### *Визуализация и обработка результатов*

Визуализировать результаты расчетов можно с использованием программы Smokeview, которая устанавливается автоматически вместе с FDS. Часть результатов удобнее обрабатывать с использованием MS Excel, MathCad, построителей графиков (Techplot, Grapher и др.), а также с помощью собственных скриптов.

### *Сторонние программы*

В некоторых случаях, например, при задании сложной геометрии для создания fds-файла, удобнее воспользоваться сторонними программами: PyroSim и PathFinder, Blender FDS, Wizz FDS. Они позволяют воспользоваться удобным графическим интерфейсом, но реализуют тот же исходный код, что и FDS. Это означает, что результаты расчетов с использованием, например, PyroSim и соответствующей версии FDS будут одинаковыми. Перечисленные пакеты могут не поддерживать некоторые новые функции FDS.

Часть из этих программ являются коммерческими, но предоставляют бесплатную академическую лицензию для студентов и преподавателей. Некоторые сторонние программы и ресурсы, а также советы по их использованию перечислены в приложении П2.

### **1.2.6. Устранение проблем и поддержка пользователей**

Большинство вопросов, связанных с использованием FDS, можно решить при внимательном прочтении документации [52]. Для ускорения навигации удобно использовать поиск по ключевым словам.

Вопросы, возникающие при использовании FDS, можно адресовать разработчикам программного обеспечения с помощью сайта дискуссионного форума:

<https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!forum/fds-smv>.

Форум активно поддерживается и используется для анонсирования новостей. Язык общения на форуме – английский.

Рекомендуем обратить внимание на подробные инструкции, материалы по апробации и верификации, планы по развитию FDS, вспомогательные скрипты и другую информацию, доступную на странице проекта на сайте github:

<https://github.com/firemodels/fds>.

### **1.2.7. Вспомогательные материалы**

Электронная версия текста данного учебного пособия, рассматриваемые fds-файлы, примеры расчетов, варианты заданий и другие вспомогательные материалы находятся здесь:

<https://github.com/eksmarkus/fds-textbook-2020>.

## **1.3. Практическая работа с FDS**

В данном разделе мы познакомимся с порядком постановки задачи и потренируемся в запуске FDS. Постановка задачи начинается с создания текстового файла со входными параметрами. Файлу нужно присвоить «говорящее» название, которое выделит данный расчётный сценарий среди других. Файл должен иметь расширение fds.

### **1.3.1. Группы параметров FDS**

Синтаксис fds-файлов подчиняется следующим правилам.

1. Параметры задачи организованы по смысловым группам. Список основных групп представлен в табл. 3. Отметим, что некоторые параметры

имеют значения по умолчанию и могут быть неявно заданы даже в том случае, если они не перечислены в используемом fds-файле. Полный список групп и соответствующих параметров (с учетом заданных по умолчанию) приведен в документации [52].

*Таблица 3*

**Список основных групп параметров FDS**

Сокращённое название	Полное название	Комментарий
BNDF	Boundary File Parameters	Поля величин на твердых поверхностях (obstructions)
DEVC	Device Parameters	Точечные измерения (аналог измерительных датчиков, например термопар)
DUMP	Output Parameters	Управление выводом данных
HEAD	Header Parameters	Параметры заголовка
HOLE	Obstruction Cutout Parameters	Создание отверстий в твердых объектах (obstructions)
MATL	Material Properties	Свойства материалов
MESH	Mesh Parameters	Параметры сетки для газовой фазы
MISC	Miscellaneous Parameters	Разное
MULT	Multiplier Function Parameters	Копирование элементов
OBST	Obstruction Parameters	Создание твердых объектов, препятствующих течению газа
RADI	Radiation Parameters	Параметры расчета переноса теплового излучения
REAC	Reaction Parameters	Параметры реакции для реакции горения в газовой фазе
SURF	Surface Properties	Задание граничных условий
TRNX, TRNY, TRNZ	Mesh Transformations	Управление параметрами сгущения сетки для газовой фазы
TIME	Time Parameters	Параметры времени
VENT	Vent Parameters	Создание плоскостей с заданными граничными условиями

2. Внутри группы параметры можно перечислять в одной или нескольких строках.

3. В начале файла обязательно указывается группа &HEAD.
4. Каждая группа параметров организована следующим образом:

&ГРУППА параметр1, параметр2 /

5. Все символы перед “&” и после “/” считаются комментарием.
6. Внутри группы параметры разделяются пробелом или запятой.
7. В конце файла надо обязательно указать &TAIL/.
8. Порядок групп и параметров не имеет значения (кроме &HEAD и &TAIL).

В одном файле может быть несколько строк, относящихся к одной и той же группе параметров.

9. Десятичный разделитель – точка.

В данном пособии мы рассмотрим те группы параметров, которые потребуются для выполнения расчётных заданий.

### 1.3.2. Пример fds-файла

Знакомство с FDS удобно начинать с запуска уже готовых fds-файлов. В папке C:\Program Files\Firemodels\FDS6\Examples\ содержатся fds-файлы, специально подготовленные разработчиками для начинающих пользователей. В качестве примера рассмотрим построчно структуру файла simple\_test.fds из папки C:\Program Files\Firemodels\FDS6\Examples\Fires:

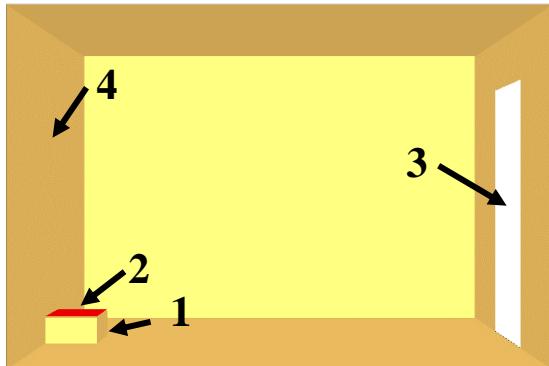
```
&HEAD      CHID='simple_test', TITLE='Simple demonstration case./'
&MESH      IJK=36,24,24, XB=0.0,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4/
&TIME      T_END=60.0/
&REAC      FUEL='PROPANE', SOOT_YIELD=0.01/
&SURF      ID='BURNER', HRRPUA=1000.0, COLOR='RED'/
&OBST      XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.0,0.2/
&VENT      XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.2,0.2, SURF_ID='BURNER'/
&VENT      XB=3.6,3.6,0.8,1.6,0.0,2.0, SURF_ID='OPEN'/
&BNDF      QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX'/
&SLCF      PBY=1.2, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&TAIL/
```

**Совет:** Используйте текстовые редакторы, для которых доступна подсветка синтаксиса FDS, например, Sublime Text, vim, NotePad ++. Подробнее о том, как настроить подсветку см. в приложении П2.

На данном этапе мы будем использовать уже готовые fds-файлы. Чтобы создать новый fds-файл, необходимо либо создать текстовый файл и заменить его расширение с txt (или dat) на fds через командную строку MS Windows, Linux: (ren \*.txt \*.fds), либо скопировать имеющийся fds-файл, переименовать его и внести необходимые изменения.

Начало fds-файла обозначается группой &HEAD с указанием буквенного идентификатора расчета CHID (character identifier). Названия всех файлов с результатом этого расчета будут начинаться с simple\_test. В файле указан заголовок 'Simple demonstration case.'. Этот параметр служит для краткого описания сценария и позволяет пользователю не запутаться в разных расчетах. Данный фрагмент fds-файла выглядит следующим образом:

```
&HEAD    CHID='simple_test',
          TITLE='Simple demonstration case.' /
```



1 - &OBST XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.0,0.2/  
 2 - &VENT XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.2,0.2,  
 SURF\_ID='BURNER' /  
 3 - &VENT XB=3.6,3.6,0.8,1.6,0.0,2.0,  
 SURF\_ID='OPEN' /  
 4 – На гранях расчетной области задано стандартное граничное условие INERT

Рис. 1. Расчетная область для тестового расчета simple\_test

Далее в группе &MESH описывается расчетная область и расчетная сетка в газовой фазе (см. рис. 1). В рассматриваемом случае расчетная область – параллелепипед, координаты вершин которого задаются параметром XB в формате X<sub>min</sub>, X<sub>max</sub>, Y<sub>min</sub>, Y<sub>max</sub>, Z<sub>min</sub>, Z<sub>max</sub> (в метрах). Количество ячеек в направлениях X, Y и Z составляет 36, 24 и 24. Ячейки сетки имеют форму кубов с размером грани 0.1 м:

```
&MESH    IJK=36,24,24,
          XB=0.0,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4/
```

В группе &TIME задается длительность расчета 60 с:

```
&TIME    T_END=60.0/
```

В группе &REAC приводится описание реакции горения в газовой фазе: задаётся горючее (пропан) и выход сажи 0.01 кг/кг горючего:

```
&REAC    FUEL='PROPANE',
          SOOT_YIELD=0.01/
```

По умолчанию полагается, что реакция горения является одностадийной, необратимой и бесконечно быстрой.

В группе &SURF создается новый пользовательский тип граничного условия, которое затем можно будет применить для твердой поверхности. В данном случае на этой поверхности будет задан расход горючего, соответствующий удельной мощности тепловыделения 1000 кВт/м<sup>2</sup> (HRRPUA = 1000.0). Чтобы эта область была выделена красным цветом в Smokeview, используется строка COLOR = 'RED'. Название поверхности (ID) выбрано так, чтобы отображать смысл этой поверхности. В рассматриваемом случае это плоская газовая горелка 'BURNER' с постоянным расходом горючего газа.

```
&SURF    ID='BURNER',
          HRRPUA=1000.0,
          COLOR='RED'/
```

**Совет:** Задавать параметр COLOR необязательно. Однако использование разных цветов позволит проверить правильность установки граничных условий при визуализации в Smokeview.

С помощью группы &OBST внутри расчетной области задаются размеры объектов (препятствий для течения газа) в форме параллелепипеда. Координаты вершин (XB) задаются в формате X<sub>min</sub>, X<sub>max</sub>, Y<sub>min</sub>, Y<sub>max</sub>, Z<sub>min</sub>, Z<sub>max</sub> (в метрах). На каждой грани можно задать свое граничное условие. По умолчанию граничное условие соответствует непроницаемой стенке при постоянной температуре 20 °C. В FDS это граничное условие называется INERT. Внутри параллелепипеда газовая фаза отсутствует. В нашем случае данная группа имеет вид:

```
&OBST    XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.0,0.2/
```

С помощью группы &VENT для верхней грани параллелепипеда XB применяется граничное условие типа SURF\_ID = 'BURNER' (такое, как задано в группе &SURF):

```
&VENT    XB=0.0,0.4,1.0,1.4,0.2,0.2,  
          SURF_ID='BURNER'/
```

В центре правой грани расчетной области зададим проём – прямоугольник (значения координат X<sub>min</sub>, X<sub>max</sub>, Y<sub>min</sub>, Y<sub>max</sub>, Z<sub>min</sub>, Z<sub>max</sub> задается в метрах параметром XB), в котором применяется граничное условие типа SURF\_ID = 'OPEN':

```
&VENT    XB=3.6,3.6,0.8,1.6,0.0,2.0,  
          SURF_ID='OPEN' /
```

Это граничное условие допускает проникновение газа, направление движения которого определяется градиентом давления.

Граничные условия для остальных граней расчетной области, не указанные в тексте fds-файла, будут заданы по умолчанию: непроницаемая стенка при постоянной температуре 20°C (тип INERT).

**Замечание:** Граничные условия типа INERT и OPEN являются стандартными для FDS. Для использования этих граничных условий достаточно указать в группах &VENT или &OBST соответствующий параметр SURF\_ID, а создавать отдельную группу &SURF не нужно.

Таким образом, с помощью последних четырёх строк рассматриваемого fds-файла задаётся геометрия помещения, в котором стены, пол и потолок совпадают с гранями расчетной области. В центре правой стены находится дверной проём, а у левой стены расположен очаг пожара – газовая горелка с постоянным расходом горючего (рис. 1).

В качестве выходных данных с помощью группы &BNDF потребуем вывод распределений теплового потока 'GAUGE HEAT FLUX' по поверхности стен:

```
&BNDF    QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
```

При этом будет записан тепловой поток, который был бы получен охлаждаемым датчиком с температурой поверхности 20 °C.

В группе &SLCF запрошено векторное поле скорости (VECTOR = .TRUE.) с векторами, окрашенными по температуре газа (&SLCF QUANTITY = 'TEMPERATURE') в плоскости, образованной прямыми Y = 1.2 м и X = 0 м (PBY = 1.2):

```
&SLCF    PBY=1.2,  
          QUANTITY='TEMPERATURE',  
          VECTOR=.TRUE./
```

В последней строке дано указание на окончание fds-файла:

```
&TAIL /
```

Полный текст из этого файла приводится в приложении П2. Данный fds-файл содержит информацию, достаточную для выполнения расчета.

### 1.3.3. Запуск расчета в однопроцессорном режиме

Поскольку при выполнении вычислений автоматически создается большое количество файлов, рекомендуется выполнять каждый расчет в отдельной папке. Это позволит также избежать перезаписи файлов с результатами при одновременном запуске нескольких расчетов. Выполняем следующие действия:

1. Создадим папку (например, FDS\_cases), в которой в отдельных подпапках будут храниться результаты разных расчетов.
2. Создадим внутри папки FDS\_cases папку Task\_0, в которую скопируем файл simple\_test.fds. Отметим, что по умолчанию файл simple\_test.fds хранится в папке C:\Program Files\Firemodels\FDS6\Examples\Fires.

Если создать понятную систему папок, то навигация между расчетами и их запуск существенно упростятся.

**Совет:** Рекомендуется запускать каждый расчет в отдельной подпапке внутри рабочей папки, а также давать папкам краткие, но «говорящие» названия. Это позволит избежать случайной перезаписи файлов с результатами расчетов при одновременном запуске нескольких задач.

Чтобы избежать проблем с кодировкой, лучше использовать в названиях папок и файлов только латинские буквы. В качестве рабочей папки рекомендуется использовать папку, для записи файлов в которую не нужно обладать правами администратора.

### 3. Выполним первичную настройку:

- MS Windows: для запуска FDS пользователи MS Windows могут использовать специальную командную строку CMDfds, ярлык которой автоматически появляется на рабочем столе компьютера при установке FDS. Назначим папку FDS\_cases рабочей для командной строки CMDfds. Для этого в ее свойствах (правая кнопка мыши по ярлыку CMDfds – «Свойства») изменим путь, указанный для рабочей папки на тот, который соответствует расположению FDS\_cases. Так будет удобнее работать.
- Linux, Mac OS X: пользователи других операционных систем могут использовать обычную командную строку. Назначать папку FDS\_cases рабочей не нужно.

### 4. Запускаем расчет:

- MS Windows: Откроем CMDfds. Укажем путь к fds-файлу. Так как папка FDS\_cases уже назначена рабочей (нужно указать полный путь к папке), необходимо указать только путь до папки Task\_0 :

```
cd Task_0
```

Для запуска на локальной машине со стандартным числом процессов по MPI и потоков по OpenMP используем команду

```
fds_local simple_test.fds
```

Для запуска другого файла нужно указать соответствующее название вместо simple\_test.fds.

- Linux, Mac OS X: Пользователи других операционных систем могут использовать обычную командную строку и ту же команду: fds\_local simple\_test.fds.

### 5. После ввода команды в командной строке будет указана информация о

продвижении расчета по времени. Более подробная информация о статусе задачи записывается в файл `simple_test.out`.

6. Для запуска в фоновом режиме необходимо ввести команду:

```
fds_local simple_test.fds > simple_test.err
```

В этом случае ход расчета будет отображен в файле `simple_test.err`.

7. Количество файлов, создаваемых в ходе расчёта, зависит от постановки задачи. Часть создаваемых файлов содержит информацию для визуализации результатов расчетов в *Smokeview*. Файлы с расширением `.csv` содержат числовые данные, которые можно использовать для построения графиков.

#### 1.3.4. Визуализация результатов расчетов в *Smokeview*

Для визуализации результатов расчёта нужно открыть файл `simple_test.smv`. Это можно сделать двойным щелчком или с помощью командной строки

```
smv simple_test.smv
```

Сначала программа *Smokeview* визуализирует геометрию задачи, показанную на рис. 1. После этого, нажав правой кнопкой на картинке, откроем меню *Smokeview*.

1. Во вкладке *Load/Unload* можно выбрать тип данных для визуализации.

- 3D *Smoke* – изоповерхности парциальной плотности сажи (`soot density`), объемной мощности тепловыделения (`HRRPUA, 200 кВт/м3`), температуры газа (`temperature, 400 °C`), массовой долиmonoоксида углерода (`carbon monoxide density`). Эти величины служат для отображения пламени и дыма, как показано на рис. 2 (`HRRPUV` и `soot density`).
- *Slice* – поля величин, запрошенных в *fds*-файле в группе `&SLCF`. В данном случае – температуры газа (`temperature`, рис. 2) и компонентов вектора скорости (`U, V, W-Velocity`) в плоскости  $X = 0$  м,  $Y = 1.2$  м.

- Vector slice – поля векторных величин.
  - Boundary – поля величин на твердых поверхностях, запрошенных в fds-файле в группе &BNDF. В данном случае это распределения теплового потока по поверхности стен (Gauge heat flux).
  - Unload all – позволяет отключить все визуализированные результаты.
2. Во вкладке Show/Hide можно отобразить параметры геометрических объектов.
- Labels/User Settable Ticks – отображение размеров расчетной области в направлении x, y, z с измерительными рисками.

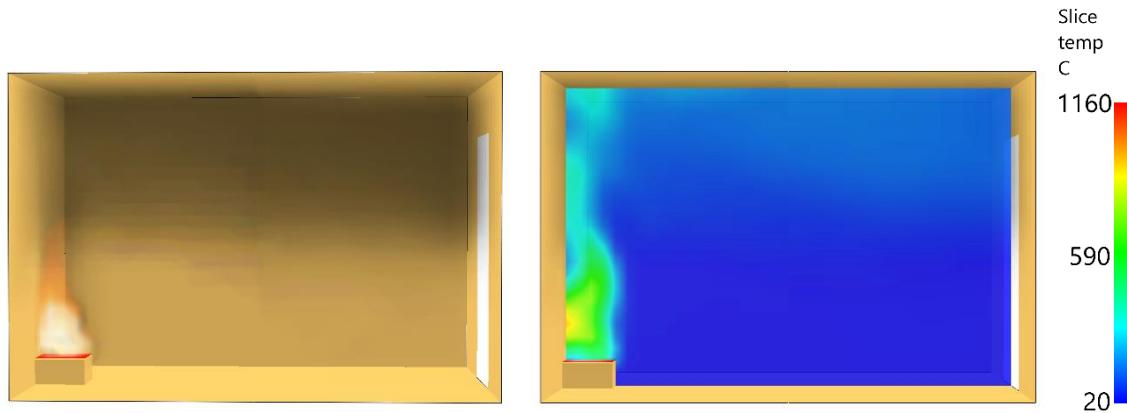


Рис. 2. Визуализация результатов тестового расчета simple\_test. Слева – изоповерхность мощности тепловыделения ( $200 \text{ кВт/м}^3$ ) и парциальной плотности сажи, справа – поле температуры газа в центральном сечении

3. Полный список функций Smokeview доступен в руководстве пользователя [56]. Краткий справочник можно найти во вкладке Help. Горячие клавиши перечислены во вкладке Help/Shortcuts (эти вкладки работают только при переключении на английскую раскладку клавиатуры). Наиболее полезны следующие горячие клавиши:

- $\tau$  – включение/остановка изменения визуализированных результатов во времени,
- $g$  – отображение расчетной сетки в плоскости Y,
- $g+x$  (последовательно) – отображение расчетной сетки в плоскости X,

- `g+z` (последовательно) – отображение расчетной сетки в плоскости Z,
- `x` – сохранение картинки в рабочей папке.

Попробуйте отобразить в Smokeview разные величины, чтобы убедиться в том, что расчет выполнен успешно.

*Совет:*

Визуализировать можно только те результаты, которые были запрошены в fds-файле. Изоповерхность мощности тепловыделения (HRR) записывается по умолчанию. Подробнее о типах файлов и их формате можно узнать в руководстве пользователя [56].

### 1.3.5. Запуск расчета многопроцессорном режиме

#### *Использование технологий MPI и OpenMP в FDS*

Для выполнения многопроцессорных вычислений FDS может использовать технологии MPI и OpenMP (совместно или по отдельности). Опыт показывает, что лучше использовать только MPI и только с физическими ядрами. Совместное использование OpenMP и MPI обычно не дает преимуществ, а использование виртуальных ядер может даже замедлить расчет.

Для использования технологии MPI необходимо разделить расчетную область на несколько частей. Каждый MPI-процесс может обрабатывать несколько частей расчетной области. При этом желательно, чтобы нагрузка между ними была распределена равномерно, то есть на каждый MPI-процесс должно приходиться примерно одинаковое число ячеек. Например, если во всей области используется равномерная сетка, то достаточно разделить ее на целое число частей.

Если в расчете используется несколько сеток с разным размером ячеек, то нужно помнить о правиле согласования сеток: грань ячейки более крупной сетки должна быть в целое число раз больше, чем грань более мелкой (см., например, рис. 3 (в)); в противном случае расчет не запустится.

Рассмотрим несколько вариантов задания расчетной сетки, показанных на рис. 3 для сценария `simple_test.fds`. На рис. 3 (а) для всей расчетной области используется одна сетка с общим числом ячеек  $36 \times 24 \times 24 = 20\,736$ , размер одной ячейки составляет  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3.6/36 = 2.4/24 = 0.1$  м:

```
&MESH IJK=36,24,24,
XB=0.0,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4 /
```

При таком задании расчетной области использовать технологию MPI не получится.

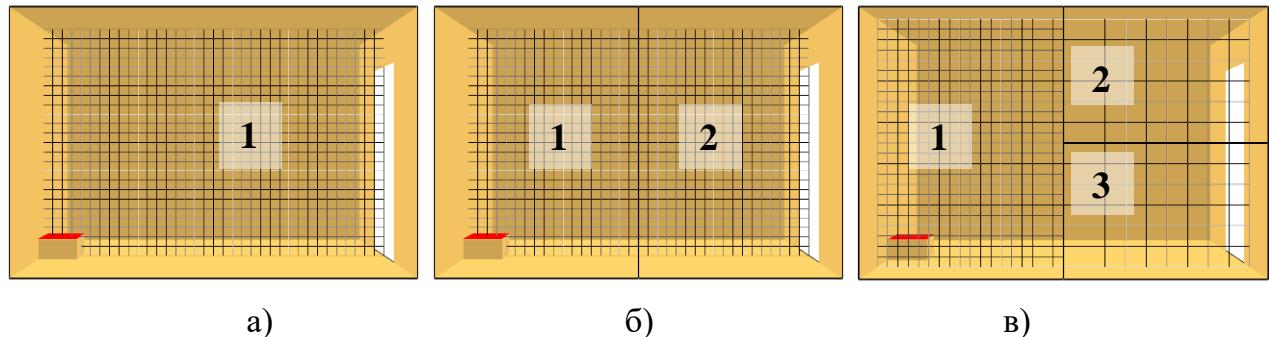


Рис. 3. Несколько вариантов задания расчетной сетки для simple\_test

На рис. 3 (б) расчетная область разделена на 2 равные части. Каждая часть содержит  $18 \times 24 \times 24 = 10\ 368$  ячеек, размер которых составляет  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3.6/36 = 2.4/24 = 0.1$  м. Общее число ячеек такое же, как и в предыдущем случае. Однако за счет использования технологии MPI такой расчет должен выполняться быстрее. Первая часть отдана на исполнение MPI-процессу номер 0, вторая часть – MPI-процессу номер 1:

```
&MESH IJK=18,24,24,
XB=0.0,1.8,0.0,2.4,0.0,2.4,
MPI_PROCESS=0/
```

```
&MESH IJK=18,24,24,
XB=1.8,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4,
MPI_PROCESS=1/
```

Номера MPI-процессов можно не указывать, и тогда части расчетной области будут автоматически распределены между доступными MPI-процессами. Если последних окажется меньше, чем частей расчетной области, то первые  $n-1$  MPI-процессов будут выполнять расчет для первых  $n-1$  частей расчетной области, а последний MPI-процесс с номером  $n$  – все оставшиеся части.

Аналогичное разбиение расчетной сетки выполняется группой &MULT, которая позволяет дублировать объекты в fds-файле (подробнее см. в руководстве пользователя [55]).

```
&MESH    IJK=18,24,24,  
          XB=0.0,1.8,0.0,2.4,0.0,2.4,  
          MULT_ID='mesh array' /  
  
&MULT    ID='mesh array',  
          DX=1.8, I_UPPER=1 /
```

На рис. 3 (в) расчетная область разделена на три части, причем в первой части размер ячейки в два раза меньше, чем во второй и третьей. Такая структура сетки позволяет увеличить сеточное разрешение только в тех частях расчетной области, где это необходимо, чтобы сократить общее число ячеек, а значит и время расчета. Поскольку количество ячеек неодинаково для разных частей, то можно часть 1 отдать на исполнение одному MPI-процессу, а части 2 и 3 – другому:

```
&MESH    IJK=18,24,24,  
          XB=0.0,1.8,0.0,2.4,0.0,2.4,  
          MPI_PROCESS=0 /  
  
&MESH    IJK=9,12,6,  
          XB=1.8,3.6,0.0,2.4,0.0,1.2,  
          MPI_PROCESS=1 /  
  
&MESH    IJK=9,12,6,  
          XB=1.8,3.6,0.0,2.4,1.2,2.4,  
          MPI_PROCESS=1 /
```

Для использования технологии OpenMP не нужно выполнять дополнительные настройки: достаточно указать только количество требуемых OpenMP-потоков.

Отметим, что в некоторых случаях использование технологии многопроцессорных вычислений может не только не ускорить расчет, но и замедлить его. Это происходит, если обмен информацией между разными процессорами и потоками занимает слишком много времени по сравнению со временем, которое каждый процессор тратит на выполнение своей части вычислений.

По данным разработчиков технология OpenMP ускоряет расчет не более, чем в два раза вне зависимости от числа потоков, назначенных для каждого процесса. Поэтому более оправданным оказывается использование большего числа процессов по MPI, при этом количество потоков по OpenMP следует назначить равным 1. Опыт, приобретённый авторами при выполнении расчетов на кластере Tornado Суперкомпьютерного центра СПбПУ, подтверждает эти рекомендации.

В то же время эффективность параллелизации может зависеть от конкретной задачи и определяется архитектурой компьютера.

### *Запуск FDS в многопроцессорном режиме*

При использовании FDS в многопроцессорном режиме нужно проделать следующие действия.

1. Оценить количество ядер, доступных для использования (см. раздел 1.2.4). Большинство современных компьютеров позволяют задействовать два MPI-процесса и два потока по OpenMP.

*Совет:* Допустим, вам доступны  $N$  MPI-процессов и  $M$  потоков по OpenMP. Если вы хотите использовать только MPI, то  $M = 1$ , а если только OpenMP, то  $N = 1$ . Произведение  $N \times M$  не должно превышать общее число доступных ядер. Если вы задействуете все ядра, то не сможете использовать компьютер для других целей, пока не закончится расчет.

2. Создать папку Task\_1\_MPI в папке FDS\_cases. Скопировать туда файл simple\_test.fds
3. Изменить файл simple\_test.fds так, чтобы его можно было запустить в многопроцессорном режиме. Для этого заменим группу

```
&MESH    IJK=36,24,24,  
          XB=0.0,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4/
```

на две группы:

```
&MESH    IJK=18,24,24,  
          XB=0.0,1.8,0.0,2.4,0.0,2.4,  
          MPI_PROCESS=0/
```

```
&MESH    IJK=18,24,24,  
          XB=1.8,3.6,0.0,2.4,0.0,2.4,  
          MPI_PROCESS=1/
```

4. Сохранить изменённый файл в папку FDS\_cases/Task\_0\_MPI под названием simple\_test\_mpi.fds.
5. Запустить расчет в соответствии со следующими рекомендациями:
  - MS Windows: Открыть CMDfds. Указать путь к fds-файлу. Так как папка FDS\_cases уже назначена рабочей, необходимо указать только путь до папки Task\_0\_MPI:

```
cd Task_0_MPI
```

Для запуска с двумя MPI-процессами и двумя OpenMP-потоками используем команду

```
fds_local -p 2 -o 2 simple_test.fds
```

- Linux, Mac OS X: В командной строке указать<sup>4</sup> путь к fds-файлу:

```
cd FDS_cases/Task_0_MPI  
export OMP_NUM_THREADS=2  
mpieexec -n 2 /home/username/.../fds simple_test.fds
```

**Замечание:** В MS Windows число после `-p` соответствует числу MPI-процессов, а после `-o` – числу потоков по OpenMP.

В Linux и Mac OS число MPI-процессов указывается после `-n`, а число потоков по OpenMP в параметре `OMP_NUM_THREADS`.

На этом этапе можно поэкспериментировать и оценить эффективность параллелизации на вашем компьютере. Попробуйте запустить расчет с разным количеством MPI-процессов и OpenMP-потоков и оценить время выполнения расчета. Если разница окажется несущественной, это может быть связано с тем, что количество ячеек сетки невелико. Увеличьте число ячеек расчетной сетки и повторите расчеты.

---

<sup>4</sup> Для удобства можно использовать менеджер задач (например, PBS/Torque или Slurm). Скрипт для запуска FDS приведен в руководстве пользователя [55].

### 1.3.6. Завершение и продолжение расчета

#### Завершение расчета

Расчет автоматически завершается, когда расчетное время становится равным параметру T\_END, указанному в группе &TIME. В ранее сформированном файле simple\_test.fds значение параметра T\_END составляет 60 с:

```
&TIME    T_END=60.0 /
```

Отметим, что шаг по времени  $\Delta t$  автоматически определяется так, чтобы выполнялось условие Куранта-Фридрихса-Леви:  $CFL = \Delta t \|u\| / \Delta < 1$ , где  $\|u\|$  – модуль вектора скорости,  $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  – характерный размер ячейки сетки (подробнее о способах управления шагом по времени см. в руководстве пользователя [55]).

Существуют два способа досрочного завершения расчета.

- Если вы не планируете продолжать этот расчет, то можно нажать сочетание клавиш CTRL+C, либо закрыть окно с командной строкой.
- Если вы хотите иметь возможность возобновить расчет позднее, то необходимо поместить в рабочую папку файл CHID.stop, где CHID – идентификатор расчета.

**Совет:** Чтобы создать новый stop-файл, нужно создать текстовый файл с названием CHID и заменить его расширение на stop. Для этого в командной строке MS Windows, Linux) следует ввести команду ren \*.txt \*.stop.

Параметр CHID указывается в группе &HEAD и не всегда совпадает с названием самого файла. Например, в файле simple\_test.fds имеем:

```
&HEAD    CHID='simple_test',  
          TITLE='Simple demonstration case' /
```

Это значит, что в папке FDS\_cases/Task\_0 необходимо создать файл simple\_test.stop. После этого в командной строке должно появиться сообщение о завершении расчета.

## *Продолжение расчета*

Чтобы возобновить расчет, сначала удалите из рабочей папки файл CHID.stop, а затем добавьте в fds-файл следующую строку:

```
&MISC    RESTART=.TRUE. /
```

Теперь расчёт можно запустить как обычно.

**Замечание:** Продолжить расчет можно только с той же конфигурацией MPI-процессов и OpenMP-потоков, которая использовалась до завершения.

## *Периодическое сохранение результатов*

Команда о периодическом сохранении текущих результатов расчёта имеет вид:

```
&DUMP    DT_RESTART=30.0/
```

где значение параметра DT\_RESTART соответствует временному интервалу (в секундах) между записью результатов.

Периодическое сохранение – страховка от внезапного отключения электроэнергии или перезапуска компьютера.

**Совет:** Не стоит выполнять сохранение слишком часто. Это увеличит длительность расчёта.

Расчет, который завершился автоматически и для которого не было указана необходимость периодического сохранения, продолжить уже не получится. В связи с этим рекомендуется всегда использовать периодическое сохранение.

Потренируйтесь останавливать и возобновлять расчет на примере simple\_test.fds. После освоения этих приемов можно перейти к выполнению расчётных заданий, описание которых приводится ниже.

## 2. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

Теплопроводность обеспечивает нагрев конструкций и горючих материалов. Достижение предельной температуры элементов конструкций приводит к их разрушению. Если температура поверхности горючих материалов превышает критическую, то становится возможным появление газофазного пламени. Кроме того, теплопередача в стены и перекрытия помещений влияет на температурный режим пожара. Приведённые примеры показывают важность расчёта нестационарной теплопроводности в твердом материале при моделировании развития пожара. В данном разделе показано, как использовать FDS для решения нестационарного уравнения теплопроводности в плоском слое твёрдого материала.

*Таблица 4*

**Теплофизические свойства некоторых строительных материалов [30] и пластмасс [44]**

Материал	$\lambda_s$ , Вт/(м·К)	$c_s$ , Дж/(кг·К)	$\rho_s$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_s c_s \rho_s$ , Вт <sup>2</sup> ·с/(м <sup>4</sup> ·К <sup>2</sup> )	$a_s = \lambda_s / (c_s \rho_s)$ , м <sup>2</sup> /с
Медь	395	385	8920	$1.4 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Алюминий	218	890	2700	$5.2 \cdot 10^8$	$9.1 \cdot 10^{-5}$
Сталь	45	460	7820	$1.6 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Бетон	0.8–1.4	880	1900– 2300	(1.3-2.8) $\cdot 10^6$	(4.0-8.4) $\cdot 10^{-7}$
Стекло	0.8	840	2600	$1.8 \cdot 10^6$	$3.7 \cdot 10^{-7}$
Кирпич	0.69	840	1600	$9.3 \cdot 10^5$	$5.2 \cdot 10^{-7}$
Гипсовая штукатурка	0.48	840	1440	$5.8 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^{-7}$
Пенобетон	0.15	1000	500	$7.5 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^{-7}$
Пробковая плита	0.08	1000	500	$4.0 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Изоляционная волокнистая плита	0.041	2090	229	$2.0 \cdot 10^4$	$8.6 \cdot 10^{-8}$
Минеральная вата	0.041	800	100	$3.3 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^{-7}$
Полиметилметакрилат	0.21	1665	1190	$4.16 \cdot 10^5$	$1.06 \cdot 10^{-7}$
Полиэтилен	0.33	1800– 2700	955	(5.67-8.50) $\cdot 10^5$	(1.92-1.28) $\cdot 10^{-7}$
Полипропилен	0.21	1930	905	$3.67 \cdot 10^5$	$1.20 \cdot 10^{-7}$

## 2.1. Постановка задачи

В плоской пластине толщиной  $\delta$  в начальный момент времени  $t = 0$  имеет место равномерное распределение температуры  $T(x) = T_0$ . Температура окружающей среды равна  $T_\infty$  (для определённости примем  $T_\infty > T_0$ ). На поверхности пластины  $x = 0$  имеет место теплообмен с окружающей средой с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , а поверхность, расположенная при  $x = \delta$ , теплоизолирована. Теплофизические свойства материала (коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность) и коэффициент теплоотдачи полагаются постоянными. В пластине отсутствуют источники и стоки тепла.

Требуется выполнить численный расчет нагрева пластины и сравнить полученные результаты с аналитическим решением, а также проанализировать влияние расчётной сетки на результаты расчета. Варианты задания отличаются численными значениями свойств материалов (см. табл. 4), толщины слоя, коэффициента теплоотдачи и температуры окружающей среды.

## 2.2. Аналитическое решение

Рассмотрим плоский слой толщиной  $\delta$  и направим ось  $x$  по нормали к поверхности слоя (см. рис. 4).

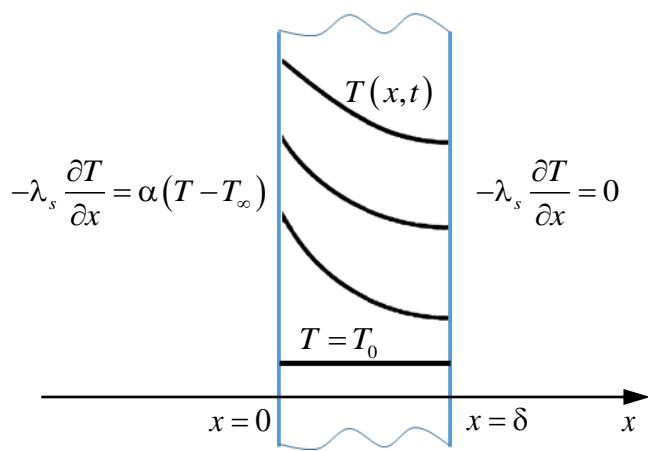


Рис. 4. Постановка задачи о нестационарной теплопроводности в плоском слое

Так как свойства материала (коэффициент теплопроводности  $\lambda_s$ , теплоёмкость  $c_s$  и плотность  $\rho_s$ ) постоянны, одномерное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $a_s = \lambda_s / (c_s \rho_s)$  – коэффициент температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). С учётом приведённой постановки задачи запишем начальное и граничные условия для уравнения (1):

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad (2)$$

$$x = 0: \quad -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_\infty), \quad (3)$$

$$x = \delta: \quad -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Аналитическое решение уравнения (1) с начальным условием (2) и граничными условиями (3) и (4) имеет вид [7, стр. 195]:

$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos\left(\mu_n \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_s t}{\delta^2}\right), \quad (5)$$

где  $\mu_n$  – корни уравнения ( $\text{Bi} = \alpha \delta / \lambda_s$  – число Био):

$$\mu \operatorname{tg}(\mu) = \text{Bi}. \quad (6)$$

При  $a_s t / \delta^2 > 0.3-0.5$  распределение температуры достаточно точно описывается первым членом ряда (5):

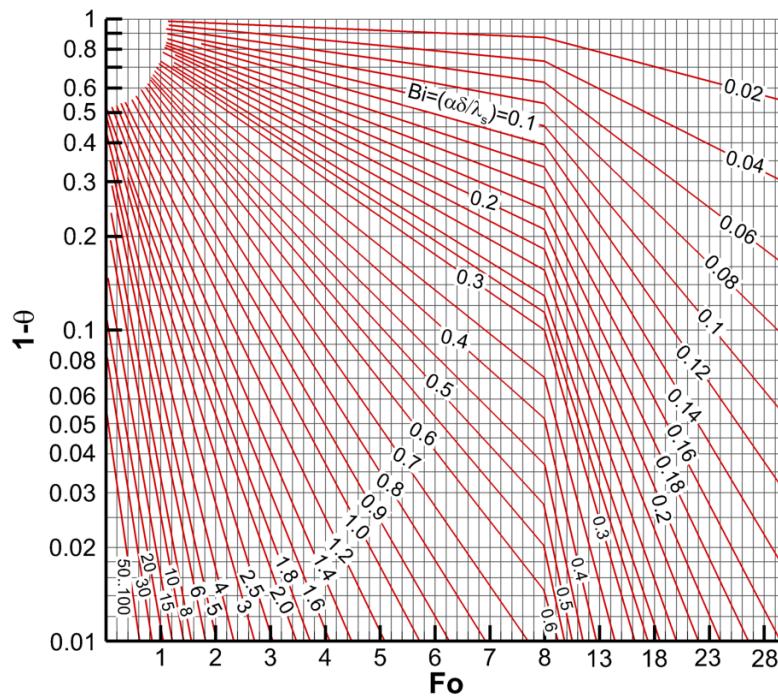
$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \cos\left(\mu_1 \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)\right) \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_s t}{\delta^2}\right), \quad (7)$$

где значение  $\mu_1$  (первый корень уравнения (4)) возрастает от нуля при  $\text{Bi} \rightarrow 0$  до  $\pi/2$  при  $\text{Bi} \rightarrow \infty$ .

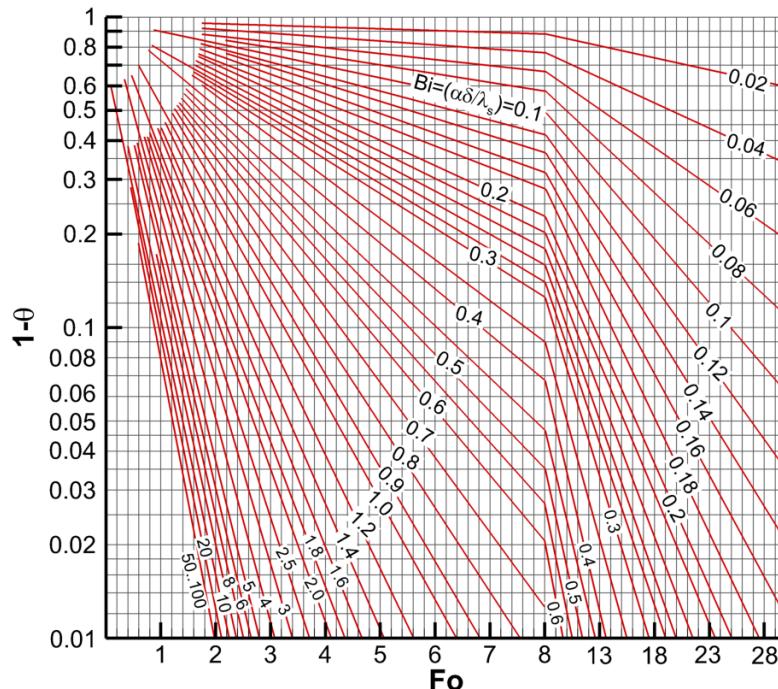
Таким образом, безразмерная температура  $\theta = (T - T_0) / (T_\infty - T_0)$  является функцией двух безразмерных аргументов (число Фурье  $\text{Fo} = a_s t / \delta^2$  и безразмерная координата  $x / \delta$ ) и числа Био. Решение рассматриваемой задачи можно представить в виде номограмм, показанных на рис. 5 для нагреваемой и теплоизолированной поверхностей или номограмм, представленных в монографии [7] (А.В. Лыков, 1967).

Равенство (7) показывает, что величину  $\tau_{rel} = (\delta^2 / a_s) / \mu_1^2$  можно интерпретировать как характерное время релаксации температурного поля в слое. При

этом в зависимости от интенсивности внешнего теплообмена (числа Био) имеют место следующие предельные случаи.



а) Нагреваемая поверхность



б) Теплоизолированная поверхность

Рис. 5. Зависимость безразмерной температуры поверхности слоя от числа Фурье для разных значений числа Био [6] (В.П. Исаченко и др., 1975)

Если число Би очень велико ( $Bi \rightarrow \infty$ ), то граничное условие (3) принимает вид

$$x=0: T=T_\infty, \quad (8)$$

а собственные числа (корни уравнения (6)) становятся равными  $\mu_n = (2n-1)(\pi/2)$ , причем в пределе  $Bi \rightarrow \infty$  собственные числа не зависят от числа Био. В связи с этим, изменение температуры на больших временах обусловлено экспонентой  $\exp(-\mu_1^2 a_s t / \delta^2) = \exp(-(\pi^2/4)Fo)$ , а для времени релаксации имеем  $\tau_{rel} = (4/\pi^2)(\delta^2/a_s)$ . Эта величина определяется свойствами материала, поскольку изменение температуры зависит только от теплопередачи внутри слоя. В данном случае задачу называют *внутренней* [7].

Если же число Био очень мало ( $Bi \rightarrow 0$ ), то корни уравнения (6) стремятся к пределу  $\mu_n = (n-1)\pi$ . В частности, для первого собственного числа имеем  $\operatorname{tg}(\mu_1) \approx \mu_1$ , и с учетом равенства (6)  $\mu_1^2 = Bi$  при  $Bi \rightarrow 0$ . Это значит, что изменение температуры на больших временах обусловлено экспонентой  $\exp(-\mu_1^2 a_s t / \delta^2) = \exp(-Bi \cdot Fo) = \exp(-\alpha t / (c_s \rho_s \delta))$ , а характерное время релаксации поля температуры становится равным  $\tau_{rel} = c_s \rho_s \delta / \alpha$ . Эта величина определяется коэффициентом теплоотдачи и теплоёмкостью материала. Важно отметить, что время релаксации в пределе  $Bi \rightarrow 0$  не зависит от теплопроводности материала, поскольку скорость изменения температуры определяется не теплопередачей в слое, а интенсивностью внешнего теплообмена. В данном случае задачу называют *внешней* [7].

Температура в слое отличается от стационарного значения менее, чем на 1%, если длительность нагрева составляет примерно  $5\tau_{rel}$ . В связи с этим можно полагать, что поле температуры в слое выравнивается за время

$$t > \tau_{0.99} \approx 5 \max \left( \underbrace{\frac{4}{\pi^2} \frac{\delta^2}{a_s}}_{Bi \gg 1}, \underbrace{\frac{c_s \rho_s \delta}{\alpha}}_{Bi \ll 1} \right). \quad (9)$$

Критерий (9) применим для любых значений числа Био. Можно заключить, что длительность релаксации температурного поля к стационарному состоянию определяется самым медленным из двух видов теплопередачи: в окружающей среде (при  $Bi \ll 1$ ) или внутри слоя (при  $Bi \gg 1$ ). Отметим, что время релаксации поля температуры пропорционально  $\delta^2$  при  $Bi \rightarrow \infty$  и пропорционально  $\delta$  при  $Bi \rightarrow 0$ .

**Замечание:**

Скорость релаксации температурного поля к своему стационарному (или квазистационарному) состоянию зависит от толщины слоя, температуропроводности материала и интенсивности теплообмена с окружающей средой. Эти факторы влияют на численное значение характерного времени релаксации  $\tau_{rel}$ .

В зависимости от соотношения длительности процесса  $t$  и характерного времени тепловой релаксации  $\tau_{rel}$  реализуются предельные случаи, в которых слой является термически толстым или термически тонким.

### 2.2.1. Термически толстый слой

Предел *термически толстого слоя* имеет место при малых временах ( $t \ll \tau_{rel}$ ). В этом случае толщина прогретой части слоя намного меньше  $\delta$ . Это значит, что толщину слоя можно считать бесконечно большой и принять  $\delta \rightarrow \infty$ . Аналитическое решение рассматриваемой задачи в этом случае имеет вид:

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_\infty - T_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}} + \frac{\sqrt{a_s t}}{\lambda_s/\alpha}\right) \exp\left(\frac{x}{\lambda_s/\alpha} + \frac{a_s t}{(\lambda_s/\alpha)^2}\right). \quad (10)$$

В частности, для температуры нагреваемой поверхности ( $x = 0, t > 0$ ) выполняется равенство:

$$\frac{T(0,t) - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{a_s t}}{\lambda_s/\alpha}\right) \exp\left(\frac{a_s t}{(\lambda_s/\alpha)^2}\right). \quad (11)$$

В пределе  $\sqrt{a_s t} \ll \lambda_s/\alpha$  равенство (11) принимает вид:

$$\frac{T(0,t) - T_0}{T_\infty - T_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{a_s t}}{\lambda_s/\alpha}, \quad (12)$$

а в противоположном пределе  $\sqrt{a_s t} \gg \lambda_s/\alpha$  правая часть равенства (11) близка к единице (в этом случае температура поверхности близка к температуре окружающей среды). Следовательно, в качестве приближенного аналитического решения, удовлетворяющего обоим пределам, для температуры поверхности термически толстого слоя можно использовать следующее равенство:

$$\frac{T(0,t) - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{1}{1 + (2/\sqrt{\pi})\sqrt{a_s t}/(\lambda_s/\alpha)} = 1 - \frac{1}{1 + (2/\sqrt{\pi})\text{Bi}\sqrt{\text{Fo}}}. \quad (13)$$

С учетом приближенного соотношения (13) для теплового потока, поступающего в слой, получим:

$$q''_{net}(t) = \alpha(T_\infty - T(0,t)) \approx \lambda_s \frac{T_\infty - T_0}{\lambda_s/\alpha + (2/\sqrt{\pi})\sqrt{a_s t}}. \quad (14)$$

Знаменатель в правой части равенства (14) показывает, что эффективная толщина прогретого слоя содержит два слагаемых, одно из которых учитывает интенсивность теплообмена с окружающей средой ( $\lambda_s/\alpha$ ), а второе – теплопроводность в слое ( $\sqrt{a_s t}$ ). Это значит, что слой можно считать термически толстым, если одновременно выполняются два условия  $\lambda_s/\alpha \ll \delta$  и  $\sqrt{a_s t} \ll \delta$ , эквивалентные неравенствам  $Bi \gg 1$  и  $Fo \ll 1$ .

**Замечание:** Приближение термически толстого слоя справедливо на малых временах (малое число Фурье) при интенсивном теплообмене на поверхности (большое число Био).

Приведенные соотношения показывают, что характерным масштабом времени изменения температуры нагреваемой поверхности является величина  $(\lambda_s/\alpha)^2/a_s = \lambda_s c_s \rho_s / \alpha^2$ . Можно убедиться, что этот масштаб времени соответствует равенству  $FoBi^2 = 1$ .

Если коэффициент теплоотдачи очень велик, то граничное условие (3) принимает вид равенства (8):  $T(0,t) = T_\infty$ . В этом случае нестационарное поле температуры в полубесконечном слое описывается равенством

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_\infty - T_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right), \quad (15)$$

а для теплового потока выполняется равенство

$$q''_{net}(t) = \lambda_s \frac{T_\infty - T_0}{\sqrt{\pi a_s t}}. \quad (16)$$

Отметим, что приближенное равенство (14), полученное с помощью асимптотики  $\sqrt{a_s t} \ll \lambda_s/\alpha$ , в противоположном пределе  $\sqrt{a_s t} \gg \lambda_s/\alpha$  отличается от точного равенства (16) множителем  $\pi/2$  перед вторым слагаемым в знаменателе.

Если число Био достаточно велико, то независимо от фактической толщины слоя  $\delta$  начальная стадия нагрева соответствует термически толстому пределу. Продолжительность начальной стадии зависит от  $\delta$ , а также от свойств материала и  $\alpha$ . По истечении начальной стадии происходит переход к пределу термически тонкого слоя. В качестве границы между двумя стадиями нагрева, соответствующими указанным пределам, можно принять  $\tau_{tr} = (\delta - \lambda_s/\alpha)^2/a_s = (1 - 1/Bi)^2 \delta^2/a_s$ , где  $\delta > \lambda_s/\alpha$  и  $Bi > 1$ . Видно, что  $\tau_{tr} < \tau_{rel} \sim \delta^2/a_s$ . При больших числах Био имеем  $\tau_{tr} \approx \tau_{rel}$ .

### 2.2.2. Термически тонкий слой

На достаточно больших временах ( $t \gg \tau_{rel}$ ) и при малой интенсивности теплообмена с окружающей средой ( $Bi \ll 1$ ) слой становится *термически тонким*. В этом случае, если обратная сторона слоя теплоизолирована, то слой почти равномерно прогревается на всю толщину. Поскольку температура  $T(x,t)$  перестает зависеть от  $x$ , рассматриваемая задача (1)-(4) упрощается и принимает вид:

$$c_s \rho_s \delta \frac{d\bar{T}}{dt} = \alpha (\bar{T} - T_\infty), \quad (17)$$

где  $\bar{T}$  – температура, осредненная по толщине слоя:  $\bar{T} = \int_0^\delta T(x,t) dx / \delta$ .

В самом деле, интегрируя уравнение (1) от  $x=0$  до  $x=\delta$ , с учётом граничных условий (3) и (4) получим:

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{1}{c_s \rho_s \delta} \left( -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{\alpha (T|_{x=0} - T_\infty)}{c_s \rho_s \delta}. \quad (18)$$

Равенства (17) и (18) эквивалентны, если  $T|_{x=0} \approx \bar{T}$ , т.е. перепад температуры в слое достаточно мал.

Если рассматривается промежуток времени, намного больший, чем длительность начальной стадии нагрева (в течение которой применимо приближение термически толстого слоя), то в качестве начального условия можно приблизенно полагать  $\bar{T} = T_0$  при  $t=0$ . В этом случае решение уравнения (17) имеет вид:

$$\frac{\bar{T}(t) - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{c_s \rho_s \delta}\right). \quad (19)$$

Полезно отметить связь равенства (19) с общим решением (5). Интегрируя равенство (5) от  $x = 0$  до  $x = \delta$ , получим для средней температуры слоя:

$$\frac{\bar{T} - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\text{Bi}/\mu_n)^2}{\mu_n^2 + \text{Bi}(\text{Bi}+1)} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_s t}{\delta^2}\right), \quad (20)$$

причем на больших временах в равенстве (20) можно сохранить лишь первый член ряда:

$$\frac{\bar{T} - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{2(\text{Bi}/\mu_1)^2}{\mu_1^2 + \text{Bi}(\text{Bi}+1)} \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_s t}{\delta^2}\right). \quad (21)$$

Равенства (20) и (21) выполняются при любых числах Био. В пределе малых чисел Био имеем  $\mu_1^2 = \text{Bi}$ , и равенство (21) принимает вид:

$$\frac{\bar{T} - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{1}{1 + \text{Bi}/2} \exp\left(-\text{Bi} \frac{a_s t}{\delta^2}\right) \xrightarrow{\text{Bi} \rightarrow 0} 1 - \exp(-\text{Bi} \text{Fo}). \quad (22)$$

Видно, что в пределе малых чисел Био общее решение приводит к равенству (19) для средней температуры в слое.

Равенство (19) показывает, что характерное время релаксации в пределе термически тонкого слоя составляет  $\tau_{rel} = c_s \rho_s \delta / \alpha$ , что соответствует равенству  $\text{FoBi} = 1$ . Полное выравнивание температуры в слое можно условно определить критерием  $\theta > 0.99$ , где  $\theta = (T - T_0) / (T_\infty - T_0)$ . В соответствии с равенством (19) этот критерий выполняется при  $t > 4.6 c_s \rho_s \delta / \alpha = 4.6 \tau_{rel}$ .

### Замечание:

В зависимости от соотношения длительности прогрева и времени релаксации температурного поля в пластине, пластину можно считать термически толстой или термически тонкой. В пределе термически толстого слоя поле температуры вблизи нагреваемой поверхности не зависит от толщины пластины. В пределе термически тонкого слоя в пластине устанавливается стационарное (или квазистационарное) поле температуры.

С течением времени происходит переход от одного режима нагрева к другому.

### 2.2.3. Нагрев пластины при заданном тепловом потоке на поверхности. Тепловая теория воспламенения

Приведенное выше решение уравнения теплопроводности в пластине получено с граничным условием (3), в соответствии с которым тепловой поток, поступающий в пластину равен  $q''_{net} = \alpha(T_\infty - T)$ . В математической физике и теории теплопроводности такое граничное условие называют граничным условием *третьего рода*. Граничные условия третьего рода используются для описания конвективного теплообмена с потоком газа или жидкости. Напомним, что в пределе очень больших значений коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  граничное условие третьего рода трансформируется в условие *первого рода* (8), которое накладывается на значение искомой функции. В данном разделе рассмотрим постановку задачи с граничным условием *второго рода*

$$x=0: -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} = q''_{net}, \quad (23)$$

где тепловой поток  $q''_{net}$ , в отличие от граничного условия третьего рода, не связан с искомой функцией. Граничное условие (23) применяется для описания внешнего теплового потока, например электрического нагрева или теплового излучения.

Пусть плоская неограниченная пластина, теплоизолированная с одной стороны (граничное условие (4)) нагревается постоянным тепловым потоком с другой (граничное условие (23) при  $q''_{net} = \text{const}$ ). Аналитическое решение уравнения (1) с граничными условиями (23), (4) и начальным условием (2) имеет вид [7, стр. 154]:

$$\frac{\lambda_s (T(x,t) - T_0)/\delta}{q''_{net}} = \frac{a_s t}{\delta^2} - \frac{1}{6} \left( 1 - 3 \left( 1 - \frac{x}{\delta} \right)^2 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos \left( \mu_n \left( 1 - \frac{x}{\delta} \right) \right) \exp \left( -\mu_n^2 \frac{a_s t}{\delta^2} \right), \quad (24)$$

где  $\mu_n = n\pi$  – собственные числа.

Особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что она не имеет стационарного решения. В самом деле, в отсутствие теплопотерь на теплоизолированной поверхности и при непрерывном поступлении тепла на нагрева-

мой поверхности имеет место неограниченный рост температуры<sup>5</sup>. Эта особенность проявляется в аналитическом решении данной задачи (24) благодаря неограниченно растущему слагаемому  $a_s t / \delta^2$  в правой части. Вместе с тем, второе слагаемое в правой части равенства (24) показывает, что после затухания всех членов ряда, содержащих убывающие функции  $\exp(-\mu_n^2 a_s t / \delta^2)$ , в пластине устанавливается квазистационарное параболическое распределение температуры. В квазистационарном режиме температура теплоизолированной поверхности отстает от температуры нагреваемой поверхности, причём разность температур равна  $\Delta T = q''_{net} / (2\lambda_s / \delta)$ .

На малых временах (начало нагрева) слой можно считать *термически толстым*. В этом случае аналитическое решение рассматриваемой задачи не зависит от  $\delta$  и имеет следующий вид:

$$\frac{\lambda_s (T - T_0) / \sqrt{4a_s t}}{q''_{net}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_s t}\right) - \frac{x}{\sqrt{4a_s t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4a_s t}}\right). \quad (25)$$

Для нас важна температура нагреваемой поверхности, выражение для которой следует из равенства (25) при  $x = 0$  и  $t > 0$ :

$$\frac{\lambda_s (T(0,t) - T_0) / \sqrt{4a_s t}}{q''_{net}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}, \quad (26)$$

откуда

$$T(0,t) = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q''_{net}}{\lambda_s} \sqrt{a_s t}. \quad (27)$$

При длительном нагреве слой становится *термически тонким*, и в нем устанавливается квазистационарное распределение температуры. Если определить среднюю температуру как  $\bar{T} = \int_0^\delta T(x,t) dx / \delta$  и проинтегрировать уравнение (1) от  $x = 0$  до  $x = \delta$ , то с учётом граничных условий (23) и (4) для средней

<sup>5</sup> Если имеет место нагрев пластины радиационным тепловым потоком, то граничное условие на нагреваемой поверхности помимо поглощенного радиационного потока должно включать собственное излучение поверхности и конвективный теплообмен с окружающей средой (см. равенство (33)). В этом случае стационарное состояние существует. В самом деле, по мере нагрева поверхности пластины интенсивность собственного излучения и конвективная теплоотдача увеличиваются. Это приводит к тому, что поступающий в пластину поток не постоянен: с течением времени он уменьшается до нуля при приближении к стационарному состоянию.

температуры  $\bar{T}$  получим следующее уравнение теплового баланса:

$$c_s \rho_s \delta \frac{d\bar{T}}{dt} = q''_{net}. \quad (28)$$

Легко убедиться, что общее решение (24) на больших временах (когда все члены ряда в правой части достаточно малы) для температуры, осредненной по толщине слоя, также приводит к уравнению (28).

В качестве начального условия для уравнения (28) следует взять момент времени  $t = t_{tr}$ , соответствующий переходу от начальной стадии нагрева (термически толстый слой) к стадии, на которой слой становится термически тонким. Будем полагать, что перепад температуры в слое мал по сравнению со средним значением:  $\bar{T} \gg \Delta T$ , где  $\Delta T = q''_{net}/(2\lambda_s/\delta)$ , и, следовательно, температура нагреваемой поверхности незначительно отличается от средней:  $T(0,t) \approx \bar{T}$ . В этом случае переход от одной стадии к другой удобно определить как момент времени, в который скорость роста температуры поверхности  $T(0,t)$ , определяемой равенством (27), равна скорости роста средней температуры  $\bar{T}$ , определяемой равенством (28). Вычисляя производную  $dT(0,t)/dt$  по (27) и сравнивая результат с  $d\bar{T}/dt = q''_{net}/(c_s \rho_s \delta)$ , получаем для момента перехода  $a_s t_{tr}/\delta^2 = 1/\pi$ . В связи с этим в качестве начального условия для уравнения (28) используем

$$t = \frac{1}{\pi} \frac{\delta^2}{a_s} : \quad \bar{T} = T_0 + \frac{2}{\pi} \frac{q''_{net}}{\lambda_s/\delta}, \quad (29)$$

где значение  $\bar{T}$  принято равным значению  $T(0,t_{tr})$ . Решение уравнения (28) с начальным условием (29) имеет вид:

$$\bar{T} = T_0 + \frac{q''_{net}}{\lambda_s/\delta} \left( \frac{a_s t}{\delta^2} + \frac{1}{\pi} \right). \quad (30)$$

Сшивка двух приближённых решений, соответствующих пределам термически толстого (27) и термически тонкого (30) слоев, дается равенством

$$\lambda_s \frac{T - T_0}{\delta} \frac{1}{q''_{net}} = \begin{cases} \sqrt{(4/\pi)(at/\delta^2)}, & at/\delta^2 < 1/\pi \text{ -- термически толстый слой} \\ 1/\pi + at/\delta^2, & at/\delta^2 \geq 1/\pi \text{ -- термически тонкий слой} \end{cases}, \quad (31)$$

где  $T$  – температура нагреваемой поверхности. Комбинированная зависимость безразмерной температуры  $\Theta = (\lambda_s/\delta)(T - T_0)/q''_{net}$  от числа Фурье  $Fo = at/\delta^2$

оказана сплошными линиями на рис. 6.

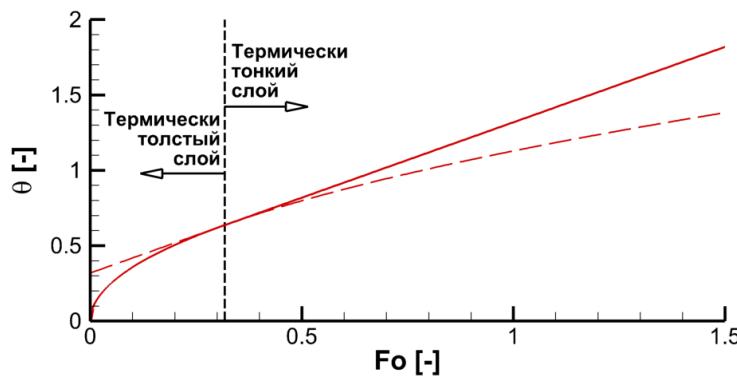


Рис. 6. Сшивка решений для температуры нагреваемой поверхности

Приближенное аналитическое решение (31) используется в тепловой теории воспламенения твердых горючих материалов, в соответствии с которой воспламенение происходит при достижении предельной температуры на нагреваемой поверхности. Полагая  $T = T_{ign}$ , где  $T_{ign}$  – температура воспламенения, получаем из (31) выражение для времени задержки воспламенения:

$$\tau_{ign} = \min \left( \underbrace{\frac{\pi}{4} \lambda_s c_s \rho_s \left( \frac{T_{ign} - T_0}{q''_{net}} \right)^2}_{\text{Термически толстый слой}}, \underbrace{\delta c_s \rho_s \frac{T_{ign} - T_0}{q''_{net}} - \frac{1}{\pi} \frac{\delta^2}{a_s}}_{\text{Термически тонкий слой}} \right). \quad (32)$$

Равенство (32) дает зависимость времени задержки воспламенения от теплового потока, полученного слоем<sup>6</sup>. Напомним, что равенства выражения в правой части (32) справедливы, если тепловой поток  $q''_{net}$  остается постоянным при нагреве пластины вплоть до её воспламенения. Величина теплового потока, поступающего в слой материала при нагреве внешним радиационным потоком  $q''_{ext}$ , определяется следующим образом:

$$q''_{net} = \underbrace{\varepsilon q''_{ext}}_{\substack{\text{Поглощенный} \\ \text{радиационный поток}}} - \underbrace{\varepsilon \sigma T^4}_{\substack{\text{Собственное} \\ \text{излучение}}} - \underbrace{\alpha(T - T_0)}_{\substack{\text{Конвективный} \\ \text{теплообмен}}}, \quad (33)$$

где  $T$  – температура нагреваемой поверхности. Можно заключить, что при постоянном значении  $q''_{ext}$  условие  $q''_{net} \approx \text{const}$  приближенно выполняется, если

---

<sup>6</sup> В существующей литературе (см., например [42, 43, 24, 37] и др.) приводятся выражения, в которых для термически тонкого слоя слагаемое  $-(\delta^2/a_s)/\pi$  отсутствует. В этом случае зависимость  $\tau_{ign}$  от  $q''_{net}$  терпит разрыв при переходе от одного предела к другому. Равенство (32) лишено этого недостатка.

внешний тепловой поток достаточно велик:  $\varepsilon q''_{ext} \gg \varepsilon\sigma T^4 + \alpha(T - T_0)$ .

Равенство (33) показывает, что воспламенение не происходит ( $\tau_{ign} \rightarrow \infty$ ), если  $q''_{net} \rightarrow 0$ . В соответствии с равенством (33) существует критическое значение внешнего теплового потока

$$q''_{ext,cr} = \sigma T_{ign}^4 + (\alpha/\varepsilon)(T_{ign} - T_0) \approx \sigma T_{ign}^4, \quad (34)$$

а воспламенение происходит только если  $q''_{ext} > q''_{ext,cr}$ .

Приближённый метод расчёта времени задержки воспламенения (тепловая теория) заключается в том, чтобы определить, как долго поверхность материала нагревается до критической температуры  $T_{ign}$ . Если внешний поток слишком мал,

**Замечание:** то критическая температура не достигается, и воспламенение не происходит.

Для расчёта температуры нагреваемой поверхности в FDS численно решается нестационарное уравнение теплопроводности в плоском слое.

## 2.3. Применение FDS

Покажем, как задача о нестационарной теплопроводности в неограниченной пластине решается численно с помощью FDS. При выполнении данного задания будем использовать файл `heat_conduction_a.fds`, который включен в стандартный набор примеров fds-файлов и после установки FDS на компьютер находится в папке `C:\Program Files\Firemodels\FDS6\Examples\Heat_Transfer`. Приведем текст этого файла:

```
&HEAD      CHID='heat_conduction_a',
            TITLE='Heat transfer through the solid slab' /
&MESH      IJK=3,3,3, XB=-0.15,0.15,-0.15,0.15,0.0,0.3 /
&TIME      T_END=2000., WALL_INCREMENT=1, DT=0.5 /
&MISC      SOLID_PHASE_ONLY=.TRUE., ASSUMED_GAS_TEMPERATURE=120. /
&SURF      ID = 'SLAB'
            MATL_ID = 'SLAB_A'
            THICKNESS = 0.1
            STRETCH_FACTOR = 1.
            HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT = 100.
            BACKING = 'INSULATED' /
```

```

&MATL      ID = 'SLAB_A'
            CONDUCTIVITY = 0.1
            EMISSIVITY = 0.
            SPECIFIC_HEAT = 1.0
            DENSITY = 100. /
&VENT      XB = -0.05,0.05,-0.05,0.05,0.0,0.0, SURF_ID='SLAB'/
&VENT      MB='XMIN', SURF_ID='OPEN'/
&VENT      MB='XMAX', SURF_ID='OPEN'/
&VENT      MB='YMIN', SURF_ID='OPEN'/
&VENT      MB='YMAX', SURF_ID='OPEN'/
&VENT      MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN'/
&BNDF      QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
&DEVC      XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, ID='Back', QUANTITY = 'BACK
WALL TEMPERATURE'/
&DEVC      XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, ID='Front', QUANTITY = 'WALL
TEMPERATURE'/
&PROF      XYZ = 0.0,0.0,0.0, IOR = 3, ID='Inside', QUANTITY =
'TEMPERATURE'/
&TAIL/

```

Рассмотрим инструкции, содержащиеся в этом файле. В группе &HEAD задается обязательный служебный параметр CHID. Все файлы, созданные в ходе расчёта, будут иметь в своем названии строку, заданную этим параметром. Параметр TITLE является необязательным и нужен для того, чтобы дать краткое описание задачи.

```

&HEAD    CHID='heat_conduction_a',
            TITLE='Heat transfer through the solid slab'/

```

В группе &MESH задаются параметры расчетной сетки для газовой фазы. При выполнении данного задания решение уравнений газовой фазы не потребуется, но для того, чтобы запустить расчёт, нужно задать минимальный набор параметров. Параметр IJK содержит количество ячеек сетки в газовой фазе в направлениях X, Y, Z. Параметр XB задает прямоугольную расчетную область в газовой фазе в формате X<sub>min</sub>, X<sub>max</sub>, Y<sub>min</sub>, Y<sub>max</sub>, Z<sub>min</sub>, Z<sub>max</sub> (значения отделяются запятыми):

```

&MESH    IJK=3,3,3,
            XB=-0.15,0.15,-0.15,0.15,0.0,0.3 /

```

В группе &TIME указываются длительность рассматриваемого проме-

жутка времени T\_END (2000 с), необходимость решения уравнения теплопроводности на каждом шаге по времени (WALL\_INCREMENT=1) и значение шага по времени DT (0.5 с):

```
&TIME    T_END=2000.,  
         WALL_INCREMENT=1,  
         DT=0.5 /
```

Важно отметить, что шаг по времени, используемый для решения уравнений в газовой фазе, может быть меньше шага по времени, используемого для решения уравнений в твёрдой фазе. В последнем случае обновление поля температуры в твёрдой фазе выполняется не на каждом шаге по времени. Отношение шагов по времени, соответствующих твёрдой и газовой фазам, задаётся целочисленным параметром WALL\_INCREMENT. Если этот параметр равен единице, то температура твёрдой фазы обновляется одновременно с решением уравнений газовой фазы. Напомним, что в данном задании уравнения газовой фазы не решаются.

В группе &MISC перечисляются параметры, которые не входят в состав других групп и указывают, что расчет газовой фазы выполняться не будет (SOLID\_PHASE\_ONLY = .TRUE.), а температура окружающей среды ASSUMED\_GAS\_TEMPERATURE зафиксирована на уровне 120 °C. Текст, расположенный справа от наклонной черты (Case A), является комментарием.

```
&MISC    SOLID_PHASE_ONLY=.TRUE., ASSUMED_GAS_TEMPER-  
          ATURE=120./ Case A
```

В группе &SURF задается пользовательский тип граничного условия, которому присваивается свой идентификатор (ID = 'SLAB'). По этому идентификатору в группах &OBST и &VENT можно выделить геометрическую область, где это граничное условие будет использоваться. С помощью параметра MATL\_ID указывается, что данное граничное условие должно работать для материала со свойствами, описанными в группе &MATL с идентификатором ID = 'SLAB\_A'. Толщина слоя полагается равной 0.1 м (THICKNESS = 0.1), на нагреваемой поверхности ставится граничное условие третьего рода с постоянным коэффициентом теплоотдачи 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К) (HEAT\_TRANSFER\_COEFFICIENT = 100.), а на обратной стороне – условие

идеальной теплоизоляции (BACKING = 'INSULATED'). Параметр STRETCH\_FACTOR = 1 показывает, что внутри твердого материала будет использоваться равномерная сетка:

```
&SURF    ID='SLAB'
            MATL_ID = 'SLAB_A'
            THICKNESS = 0.1
            STRETCH_FACTOR = 1.
            HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT = 100.
            BACKING = 'INSULATED' /
```

**Замечание:** Для решения уравнения теплопроводности используется одномерная сетка в слое материала, а для течения газа – трехмерная сетка в области, занятой газом. Это две разные сетки.

В слое твердого материала автоматически строится неравномерная сетка со сгущением вблизи обеих поверхностей слоя. По умолчанию размер приповерхностных ячеек полагается равным  $\Delta x_1 = \sqrt{a_s \Delta t}$ , где  $\Delta t = 1$  с, а размер каждой следующей ячейки удваивается. Пример расчётной сетки, построенной таким образом, показан на рис. 7. Пользователь имеет возможность изменить размер приповерхностных ячеек (параметр CELL\_SIZE\_FACTOR) и степень растяжения ячеек по мере удаления от поверхности (параметр STRETCH\_FACTOR). Для того, чтобы уменьшить размер приповерхностных ячеек, параметр CELL\_SIZE\_FACTOR должен быть меньше единицы. По умолчанию значение параметра STRETCH\_FACTOR принимается равным 2.

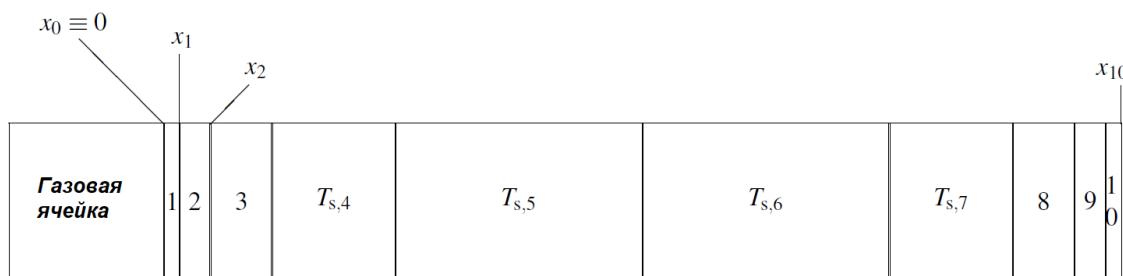


Рис. 7. Пример сетки в слое твёрдого материала. Размер ячеек увеличивается по мере удаления от поверхности до середины толщины слоя

В группе &MATL с идентификатором ID = 'SLAB\_A' заданы теплофизические свойства материала, на которые ранее была дана ссылка в группе &SURF с идентификатором ID = 'SLAB'. Используются следующие значения: для коэффициента теплопроводности 0.1 Вт/(м·К) (CONDUCTIVITY = 0.1), для степени черноты поверхности 0 (EMISSIVITY = 0.), для теплоемкости 1 кДж/(кг·К) (SPECIFIC\_HEAT = 1.0), для плотности материала 100 кг/м<sup>3</sup> (DENSITY = 100.):

```
&MATL    ID = 'SLAB_A'  
          CONDUCTIVITY = 0.1  
          EMISSIVITY = 0.  
          SPECIFIC_HEAT = 1.0  
          DENSITY = 100./
```

**Совет:** В качестве ID в группах &SURF, &MATL, &DEVC и других можно использовать любые строковые переменные. Для удобства рекомендуется использовать «говорящие» идентификаторы.

В группе &VENT задаются геометрические параметры области, где будет выполняться граничное условие, описанное в группе &SURF с идентификатором ID = 'SLAB' (SURF\_ID = 'SLAB'). В данном случае это квадратная плоская область 0.1×0.1 м (XB):

```
&VENT    XB = -0.05,0.05,-0.05,0.05,0.0,0.0,  
          SURF_ID='SLAB' /
```

**Замечание:** Задание граничного условия через группу &VENT возможно только в том случае, если это плоскость, совпадающая с одной из граней расчетной области. В остальных случаях (внутри расчетной области) должна использоваться группа &OBST.

Далее строках с группами &VENT задаются граничные условия на гранях расчетной области. Запись MB = 'XMIN' используется вместо XB = -0.15,-0.15,-0.15,0.15,0.0,0.3 для краткости, но возможны оба варианта. Граничное условие SURF\_ID = 'OPEN' позволяет задать свободно проницаемую поверхность,

поэтому создавать отдельную группу &SURF с ID = 'OPEN' и явно описывать параметры такого граничного условия не нужно:

```
&EVENT    MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&EVENT    MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&EVENT    MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&EVENT    MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&EVENT    MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

Поскольку в файле не указано иного, на нижней грани расчетной области ставится граничное условие первого рода (холодная непроницаемая стенка при температуре окружающей среды, SURF\_ID = 'INERT'). Однако в центре нижней грани выполняется граничное условие SURF\_ID = 'SLAB', как описано выше.

В группе &BNDF запрашивается вывод расчетных полей на твердых поверхностях. В данном случае будет выведено распределение температуры по поверхности (QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE'):

```
&BNDF    QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
```

В группах &DEVC запрашивается вывод локальных значений в отдельных точках. Вывод температуры обратной стороны поверхности материала (QUANTITY = 'BACK WALL TEMPERATURE') в точке с координатами (0, 0, 0) (XYZ = 0.0, 0.0, 0.0) запрашивается следующим образом:

```
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3,
          ID='Back',
          QUANTITY = 'BACK WALL TEMPERATURE' /
```

Параметр IOR = 3 указывает, что нагрев осуществляется с положительной стороны оси Z. Результат будет записан в файл heat\_conduction\_a\_devc.csv в столбец с названием, соответствующим идентификатору (ID = 'Back').

**Замечание:** Газовая и твёрдая фаза описываются в разных системах координат. Координаты, указанные в группах &DEVC, соответствуют координатам в газовой фазе, а не в твердой.

Далее потребуем вывод значений температуры в четырёх точках внутри твердого слоя (QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE') на глубине 0.02, 0.04, 0.06 и 0.08 м (DEPTH).

```
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='8 cm',
          QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
          DEPTH=0.08 /  
  
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='6 cm',
          QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
          DEPTH=0.06 /  
  
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='4 cm',
          QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
          DEPTH=0.04 /  
  
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='2 cm',
          QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
          DEPTH=0.02 /
```

Последняя группа &DEVC позволяет вывести температуру нагреваемой поверхности (QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE'):

```
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='Front',
          QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE' /
```

*Замечание:*

Группа &DEVC запрашивает вывод результатов расчёта в заданной точке, а группа &SLCF – на заданной плоскости.

Наконец, последняя строка сигнализирует об окончании списка параметров:

```
&TAIL /
```

В существующий файл heat\_conduction\_a.fds нужно внести изменения, учитывающие условия решаемой задачи. Для этого следует выполнить

следующие действия:

1. Поместить копию файла heat\_conduction\_a.fds в рабочую папку.
2. Задать начальные и граничные условия согласно варианту задания:
  - Температура окружающей среды (ASSUMED GAS TEMPERATURE)
  - Коэффициент теплоотдачи (HEAT TRANSFER COEFFICIENT)
  - Термофизические свойства (CONDUCTIVITY, SPECIFIC\_HEAT, DENSITY)
  - Толщина слоя материала (THICKNESS)
  - Начальная температура в слое (по умолчанию равна 20 °C)
  - Длительность рассматриваемого промежутка времени (T\_END) необходимо задать так, чтобы за это время пластина полностью прогрелась до температуры окружающей среды. Длительность прогрева пластины можно оценить по формуле (9) или по номограммам на рис. 5. В последнем случае следует сначала определить значение числа Био  $Bi = \alpha\delta/\lambda_s$ , а затем, используя номограмму на рис. 5 (б), выбрать число Фурье Fo так, чтобы безразмерная температура  $\theta = (T - T_0)/(T_\infty - T_0)$  составила 0.99. Значение T\_END следует положить равным  $(\delta^2/a_s)Fo$ .
3. Запросить вывод следующих величин:
  - Температура нагреваемой поверхности:

```
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,  
          IOR = 3, ID='Front',  
          QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE' /
```

- Температура обратной стороны слоя:

```
&DEVC    XYZ = 0.0,0.0,0.0,  
          IOR = 3, ID='Back',  
          QUANTITY = 'BACK WALL TEMPERATURE' /
```

Эти данные нужны для построения графика зависимости температуры нагреваемой ( $x = 0$ ) и обратной ( $x = \delta$ ) поверхности слоя от времени. Данные будут выведены в файл CHID\_devc.csv (в данном случае heat\_conduction\_a.csv). Формат файла

представлен в табл. 5. Первая строка файла содержит размерности величин, а вторая – их имена. Каждая последующая строка содержит численные значения, разделённые запятыми. Файл можно открывать в MS Excel или с помощью построителя графиков, например, Tecplot.

*Таблица 5*

**Формат файла heat\_conduction\_a.csv**

s	C	C	
Time	Front	Back	
Время (в се- кундах)	Величина, которая за- писывается в точку мо- ниторинга ID = 'FRONT'.  В данном случае – тем- пература на нагревае- мой поверхности пла- стины (в градусах Цельсия)	Величина, которая записывается в точку мониторинга ID='BACK'.  В данном случае – температура на «об- ратной» поверхно- сти пластины (в гра- дусах Цельсия)	Остальные данные, за- прошенные в группе DEVC в порядке перечис- ления в fds-файле.  В первой строке будут указаны единицы измере- ния, во второй – иден- тификатор (ID)

**Совет:** Файлы формата csv в качестве разделителя между столбцами используют запятую, а в качестве десятичного разделителя – точку. Обычно на компьютерах с MS Excel с настройками для России разделители заданы наоборот. Работать с таким файлом не очень удобно, так как значения не будут разделены на столбцы. Поэтому рекомендуем в настройках MS Excel в качестве десятичного разделителя выбрать точку, а разделителя между столбцами – запятую.

- Профиль температуры внутри слоя для каждого шага по времени:

```
&PROF    XYZ = 0.0,0.0,0.0,
          IOR = 3, ID='Inside',
          QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
```

Эти данные будут сохраняться в файл CHID\_prof\_n.csv (в данном случае heat\_conduction\_a\_prof\_1.csv). Формат файла представлен в табл. 6.

Таблица 6

**Формат файла heat\_conduction\_a\_prof\_1.csv**

Time (s)	Npoints	Npoints x Depth (m)	Npoints x Value
Время (в секундах)	Общее число ячеек сетки в твердой фазе	Координата центра n-й ячейки	Значение температуры в этой точке

Построить график зависимости температуры от координаты для заданного момента времени можно следующим образом: 1) Скопировать строку, соответствующую нужному моменту времени, начиная с 3 столбца. 2) Вставить в другое место с использованием функции транспонирования и разделить данные на 2 столбца. Предложенную процедуру можно выполнять с использованием MS Excel или скриптов. 3) График можно построить средствами Excel или Techplot (предварительно сохранив данные в файл нужного формата).

4. Удалить следующие строки:

```

&DEVC   XYZ = 0.0,0.0,0.0,
           IOR = 3, ID='8 cm',
           QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
           DEPTH=0.08 /

&DEVC   XYZ = 0.0,0.0,0.0,
           IOR = 3, ID='6 cm',
           QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
           DEPTH=0.06 /

&DEVC   XYZ = 0.0,0.0,0.0,
           IOR = 3, ID='4 cm',
           QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
           DEPTH=0.04 /

&DEVC   XYZ = 0.0,0.0,0.0,
           IOR = 3, ID='2 cm',
           QUANTITY = 'INSIDE WALL TEMPERATURE',
           DEPTH=0.02 /

```

Подготовленный файл heat\_conduction\_a.fds используется для выполнения расчётов в соответствии с инструкциями раздела 1.3.

## **2.4. Порядок выполнения задания**

Для выполнения задания следует выбрать или получить у преподавателя исходные данные (материал, толщина слоя, коэффициент теплоотдачи, температура окружающей среды) и выполнить три расчета:

1. С сеткой в твердой фазе, заданной по умолчанию.
2. С сеткой в твердой фазе, измельченной в десять раз (используя параметр CELL\_SIZE\_FACTOR).
3. С равномерной сеткой в твердой фазе (используя параметр STRETCH\_FACTOR).

Для каждого случая привести размер первой ячейки, прилегающей к нагреваемой поверхности и построить графики зависимости температуры нагреваемой и обратной стороны от времени. Для нескольких моментов времени построить распределение температуры внутри материала, вычисленной с помощью измельчённой сетки. Оценить характерные времена релаксации температуры. Сравнить температуру на нагреваемой и теплоизолированной поверхности с расчетом по nomogrammам на рис. 5 и с расчётом по приближенным формулам (12), (13), а также (19) или (36). Прокомментировать реализацию режимов нагрева в пределах термически толстого и термически тонкого слоя. Результаты и их обсуждение оформить в виде отчёта.

## **2.5. Пример расчета**

Рассмотрим прогрев стены из пенобетона, теплофизические свойства которого представлены в табл. 4. Остальные параметры задачи приведены в табл. 7. Поскольку число Био намного больше единицы ( $Bi = 20$ ), рассматриваемый случай относится к внутренним задачам: температура нагреваемой поверхности быстро достигает значений, близких к температуре окружающей среды, после чего изменение температуры в пластине определяется теплопроводностью.

На начальной стадии нагрева слой можно считать термически толстым, а характерное время релаксации температуры нагреваемой поверхности на этой стадии (см. раздел 2.2.1) равно  $\lambda_s c_s \rho_s / \alpha^2 = 750$  с. Вместе с тем, время релаксации температуры теплоизолированной поверхности составляет  $\tau_{rel} =$

$(4/\pi^2)(\delta^2/a_s) \approx 120\,000$  с. Согласно оценкам по номограммам рис. 5 (а) и формуле (9) пластина полностью прогреется до температуры окружающей среды (отличие не более 1%) за время  $\tau_{0.99} \approx 5(4/\pi^2)(\delta^2/a_s) \approx 610\,000$  с.

Таблица 7

Параметры задачи

Мате-риал	$\delta$ , м	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$T_0$ , °C	$T_\infty$ , °C	Bi	Длительность прогрева		
						Рис. 5 (а)	Формула (9)	Численный расчет
Пено-бетон	0.3	10	20	150	20	Fo = 2.1	607 927	630 000

Приближенное аналитическое решение рассматриваемой задачи на *малых* временах ( $Fo \ll 1$ ) представлено формулами (12) и (13). Аналитическое решение на *больших* временах ( $Fo > 0.3-0.5$ ) приближенно описывается равенством (7). При больших числах Био имеем  $\mu_1 = \pi/2$ , и равенство (7) принимает вид:

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{4}{\pi} \cos\left(\mu_1\left(1 - \frac{x}{\delta}\right)\right) \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{a_s t}{\delta^2}\right). \quad (35)$$

В соответствии с (35) температура нагреваемой поверхности ( $x = 0$ ) близка к температуре окружающей среды  $T(0,t) \approx T_\infty$ , а температура теплоизолированной поверхности  $T(\delta,t)$  изменяется с течением времени:

$$\frac{T(\delta,t) - T_0}{T_\infty - T_0} \approx 1 - \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{a_s t}{\delta^2}\right). \quad (36)$$

Рассмотрим результаты численных расчетов с использованием сетки, заданной в FDS по умолчанию (STRETCH\_FACTOR = 2, CELL\_SIZE\_FACTOR = 1). Распределения температуры в слое в разные моменты времени показаны на рис. 8. Сравнение численного решения с приближенными аналитическими решениями показано на рис. 9 и 10. Хорошо видно, что (в соответствии с приведенными выше оценками времен релаксации температуры) скорость изменения температуры на нагреваемой и теплоизолированной поверхностях сильно отличаются. Можно заключить, что:

1. Численное решение практически совпадает с точным аналитическим решением;

2. В областях своей применимости приближенные решения с хорошей точностью соответствуют точному и численному решению.

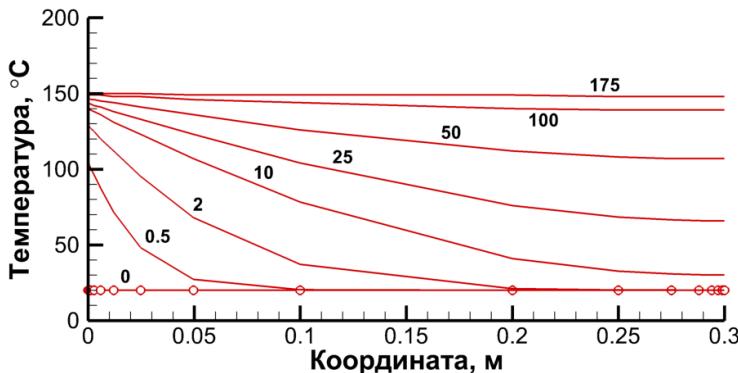


Рис. 8. Распределение температуры в пластине. Показаны моменты времени ( $\tau$ ) от начала нагрева. Символы – узлы сетки

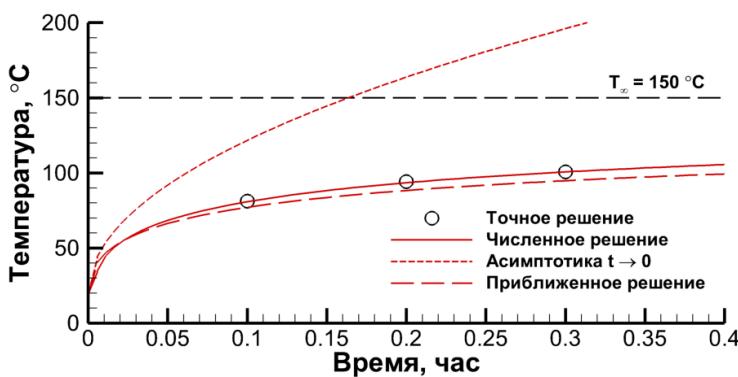


Рис. 9. Зависимость температуры на нагреваемой поверхности от времени (начальная стадия нагрева). Асимптотика – равенство (12), приближенное решение – равенство (13)

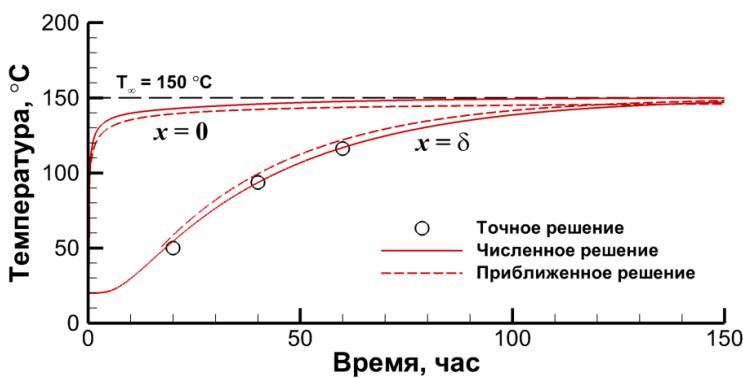


Рис. 10. Зависимость температуры на нагреваемой и теплоизолированной поверхностях от времени. Приближенное решение на больших временах:  $x = 0 - T = T_\infty$ ;  $x = \delta$  – равенство (22)

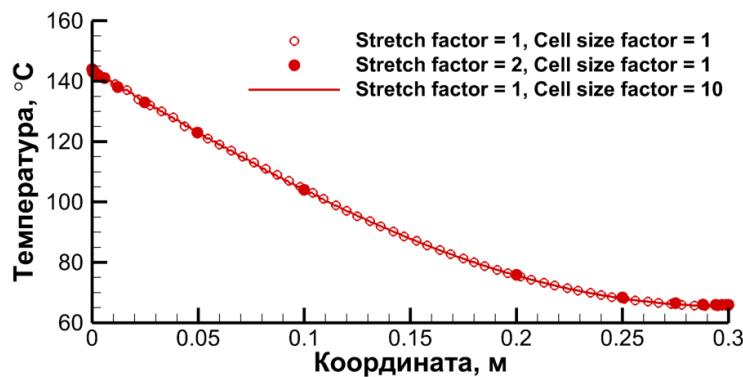


Рис. 11. Влияние расчетной сетки на расчет профиля температуры. Показано распределение температуры в момент времени 25 ч от начала нагрева

На рис. 11 показано, что изменение параметров сетки в слое материала практически не влияет на результат. Таким образом, при решении задачи о нестационарной теплопроводности в слое инертного материала можно ограничиться использованием сетки со стандартными параметрами. Отметим, что если бы в материале протекали химические реакции термического разложения, то потребовалась бы дополнительная проверка сеточного разрешения толщины зоны реакции.

*Таблица 8*

**Расчетные сетки**

Номер сетки	STRETCH_FAC TOR	CELL_SIZE_FAC TOR	Размер при-поверх-ностной ячейки $\Delta_1$ , мм	Макс. раз-мер ячейки $\Delta_{\max}$ , мм	Общее число ячеек
1	2	1	0.39	166	17
2	1	1	0.55	0.55	548
3	1	10	5.45	5.45	55

В табл. 8 показаны размеры пристеночных ячеек и их общее число в зависимости от значений STRETCH\_FACTOR и CELL\_SIZE\_FACTOR. Увеличение числа ячеек сетки в твердой фазе не приводит к существенному увеличению длительности расчета, которое не превышает нескольких минут.

### 3. ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЛАМЯ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В данной главе (и в соответствующем расчётном задании) рассматриваются структура и динамика турбулентного диффузионного естественно-конвективного пламени, которое формируется над очагом пожара в открытом пространстве. При выполнении задания активируются основные компоненты FDS, используемые для расчёта турбулентного течения, газофазного горения и теплового излучения.

#### 3.1. Постановка задачи

Рассматривается плоская горелка квадратного сечения, через которое с заданным расходом подаётся горючий газ. Исходные данные для выполнения задания содержат размер горелки (площадь поверхности  $A$ ) и мощность тепловыделения в пламени  $\dot{Q}$ , которая обусловлена массовым расходом горючего газа  $\dot{m}$ . В расчётах необходимо получить поля мгновенных и осреднённых по времени значений скорости газа, температуры и концентраций компонентов, а также вычислить тепловые потоки, создаваемые пламенем. Результаты численных расчётов следует сравнить с экспериментальными данными и приближёнными оценками по формулам, которые приведены в следующем разделе.

#### 3.2. Турбулентное диффузионное пламя

Турбулентное естественно-конвективное диффузионное пламя формируется при горении горючего газа в атмосфере. Именно такой сценарий реализуется при пожарах, в которых очаг содержит твёрдые или жидкие горючие материалы. Ключевая особенность такого пламени заключается в том, что скорость истечения горючего газа, образующегося при термическом разложении твёрдых материалов или при испарении жидкости, намного меньше скорости потока горячих продуктов сгорания, который возникает в результате естественной конвекции. Эта особенность приводит к тому, что характерное для *естественно-конвективного* пламени безразмерное число Фруда

$$Fr = \frac{V_{fuel}^2}{gD} \quad (37)$$

оказывается очень малым ( $V_{fuel}$  – скорость истечения горючего газа,  $g =$

$9.81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $D$  – характерный размер очага). Отметим, что в противоположном пределе больших чисел Фруда формируется так называемое *струйное* пламя, структура которого определяется импульсом струи горючего. Эти и другие виды пламени, возникающие при пожарах, представлены на рис. 12. Более подробно характеристики диффузионных пламён изложены в специализированной литературе, например [14, 16].

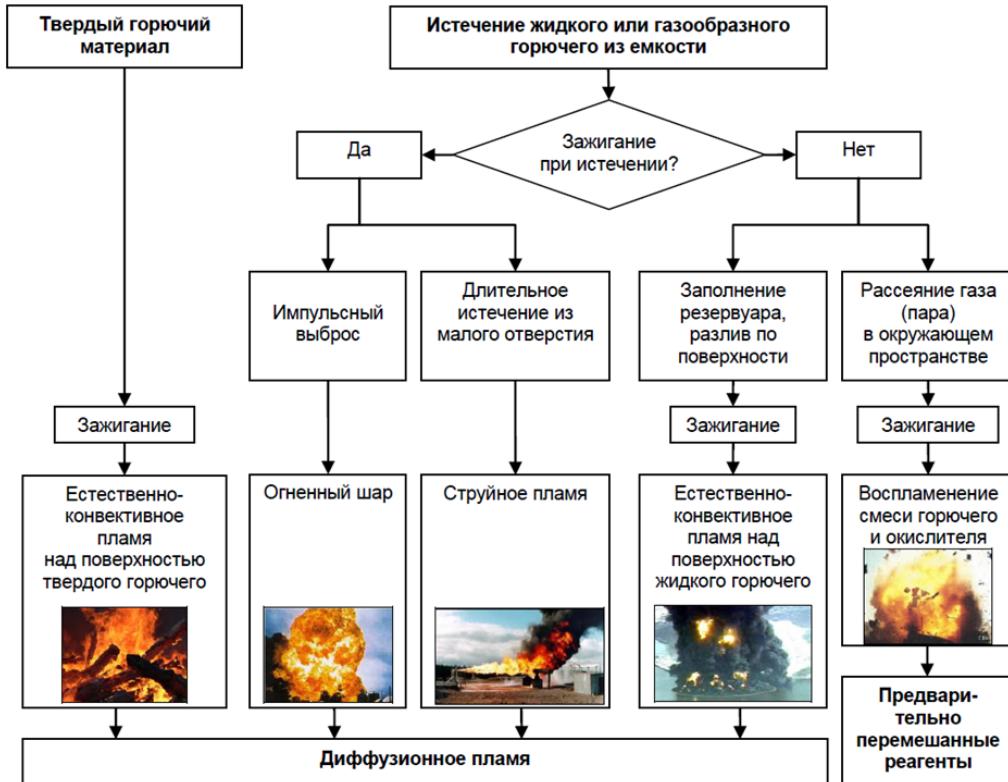


Рис. 12. Сценарии развития пожара и виды пламени [14]

Ключевой характеристикой естественно-конвективного и струйного пламени является мощность тепловыделения в нем. Если известен массовый расход горючего газа  $\dot{m}$  (кг/с) и теплота его сгорания  $\Delta h_c$  (Дж/кг), то мощность тепловыделения в пламени определяется формулой

$$\dot{Q} = f_c \Delta h_c \dot{m}, \quad (38)$$

где  $f_c \leq 1$  – полнота (или эффективность) сгорания. Для массового расхода газа будем иметь:

$$\dot{m} = m'' A, \quad (39)$$

где  $A$  – площадь поверхности очага,  $m''$  – удельный массовый расход горючего,

который будем называть *скоростью выгорания*. Мощность тепловыделения, отнесённая к площади поверхности очага, даёт удельную мощность тепловыделения:

$$Q'' = \frac{\dot{Q}}{A} = \Delta h_c m''. \quad (40)$$

Величина  $Q''$  используется в FDS в качестве характеристики очага пожара и обозначается аббревиатурой HRRPUA (Heat Release Rate per Unit Area). Численные значения  $Q''$  для разных видов горючих материалов и пожароопасных объектов приведены в табл. 9 и в разделе 5.2.1. В табл. 9 приведены литературные данные для скорости выгорания жидких и твердых горючих материалов при установившемся горении достаточно больших горизонтальных очагов.

Экспериментальные данные показывают, что скорость выгорания горючих жидкостей коррелирует с отношением теплоты сгорания к теплоте испарения. Для оценки скорости выгорания горючих жидкостей в работе [38] была предложена эмпирическая корреляция

$$m''_{\infty} = 0.001 \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{vap}}, \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с}), \quad (41)$$

где  $\Delta h_{vap}$  – теплота испарения жидкости. Формула (41) оказывается полезной, если результаты измерений для данной жидкости отсутствуют.

Рассмотрим локальный очаг пожара, расположенный вдали от стен и перекрытий. Экспериментальные данные и теоретический анализ (см., например, [37]) показывают, что в широком диапазоне размеров очага и скорости выгорания высота пламени над очагом коррелирует с величиной

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{c_{p,0} \rho_0 T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5}, \quad (42)$$

которую используют в качестве характерного вертикального пространственного масштаба для турбулентного естественно-конвективного пламени. В связи с этим для классификации видов пламени используют безразмерный параметр (безразмерная мощность тепловыделения)

$$Q^* = \left( \frac{D^*}{D} \right)^{5/2} = \frac{\dot{Q}}{c_{p,0} \rho_0 T_0 \sqrt{g D^2}}. \quad (43)$$

Таблица 9

## Свойства и скорость выгорания горючих материалов [21, 30]

Горючее	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\Delta h_{vap}^0$ , МДж/кг	$\Delta h_c$ , МДж/кг	$m''_\infty$ , г/(м <sup>2</sup> ·с)	$Q''$ , кВт/м <sup>2</sup>
<i>Криогенные горючие</i>					
Жидкий водород H <sub>2</sub>	70	0.442	120.0	17	2040
Сжиженный природный газ (в основном CH <sub>4</sub> )	415-449	0.619	50.0	78	3900
Сжиженный нефтяной газ (в основном C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	585	0.426	46.0	99	4550
<i>Спирты</i>					
Метанол CH <sub>3</sub> OH	796	1.195	20.0	15-29	300-580
Этанол C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	794	0.891	26.8		400-780
<i>Органические жидкости</i>					
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	573	0.362	45.7	78	3560
Гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	650	0.433	44.7	74-77	3310-3440
Гептан C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	675	0.448	44.6	75-101	3340-4500
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	874	0.484	40.1	85	3410
Диметилбензол C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	870	0.543	40.8	90	3670
Ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	791	0.668	25.8	38-41	980-1060
Диоксан C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1035	0.552	26.2	18	470
Диэтилэфир C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	714	0.382	34.2	85	2910
<i>Нефтепродукты</i>					
Бензин	740	0.330	43.7	48-62	2100-2710
Керосин	820		44.1	39-65	1720-2870
Авиационное горючее	760-810		43.3	51-67	2210-2900
Нефть	830-880		42.6	22-56	940-2390
Трансформаторное масло	760		46.4	39	1810
<i>Твёрдые горючие материалы</i>					
Полиэтилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		2.32	43.2	14-26	600-1120
Поликарбонат C <sub>16</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>		2.07	29.8	25	750
Полипропилен C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	905	2.03	43.2	14-24	600-1040
Полистирол C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	1050	1.3-1.8	39.8	14-35	560-1390
Полиэстер C <sub>5.77</sub> H <sub>6.25</sub> O <sub>1.63</sub>		1.39	20.3-28.5	18	370-510
Фенол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O		1.64	31.0	13	400
Полиметилметакрилат C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1190	1.62	24.9	20-30	500-750
Пенополиуретан C <sub>6.3</sub> H <sub>7.1</sub> NO <sub>2.1</sub>		1.52	23.2-28.0	21-25	490-700
Поливинилхлорид C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl			16.4	16	260

Принимая во внимание равенства  $m'' = \rho_{fuel} V_{fuel}$ , где  $\rho_{fuel}$  – плотность газообразного горючего, и  $A = \pi D^2/4$ , где  $D$  – эквивалентный диаметр очага, и используя равенства (37) и (43), можно показать, что безразмерная мощность тепловыделения пропорциональна  $\sqrt{Fr}$ :

$$Q^* = \frac{\pi}{4} \frac{f_c \rho_{fuel} \Delta h_c}{c_{P,0} \rho_0 T_0} \sqrt{Fr}. \quad (44)$$

Результаты измерений длины пламени, представленные на рис. 13, обобщаются зависимостями вида  $L_f/D \sim Q^{*n}$ . Длина диффузионного пламени  $L_f$  по-разному зависит от числа Фруда  $Fr$  и безразмерной мощности тепловыделения  $Q^*$  в разных диапазонах указанных критериев. Можно выделить три подобласти с разными значениями  $n$ :

- Крупномасштабные естественно-конвективные пламена характеризуются малыми значениями  $Q^*$ :  $Q^* < 1$ . В этом диапазоне параметров  $2/3 < n < 2$  и  $L_f < D$ .
- Если  $1 < Q^* < O(10^4)$ , то  $n = 5/2$  и  $L_f > (2-3)D$ . Как правило, параметры очага пожара относятся к этому диапазону параметров.
- При  $Q^* > O(10^5)$  безразмерная длина  $L_f/D$  пламени не зависит от  $Q^*$ : увеличение расхода горючего увеличивает мощность тепловыделения, но не влияет на длину пламени. Это характерно для струйного турбулентного пламени, если влияние естественной конвекции несущественно.

Экспериментальные данные для длины естественно-конвективного пламени в неподвижной атмосфере обобщаются следующей зависимостью:

$$\frac{L_f}{D} = 3.7 Q^{*2/5} - 1.02. \quad (45)$$

Подстановка численных значений, соответствующих атмосферному воздуху при нормальных условиях, приводит к формуле Хескестада [28]:

$$L_f = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D, \quad (46)$$

где  $\dot{Q}$  измерено в киловаттах.

Влияние размера очага на форму и структуру естественно-конвективного пламени показано рис. 14. Если размер источника горючего меньше 1 см, то

формируется ламинарное пламя, высота которого существенно больше размера очага. При увеличении размера очага до 10 см и более пламя турбулизуется, а внутри него образуется область, обогащенная горючим. При этом нижняя часть пламени, примыкающая к поверхности горючего, остается ламинарной. Если площадь очага очень велика, то формируется совокупность отдельных пламен, высота которых меньше размера очага.

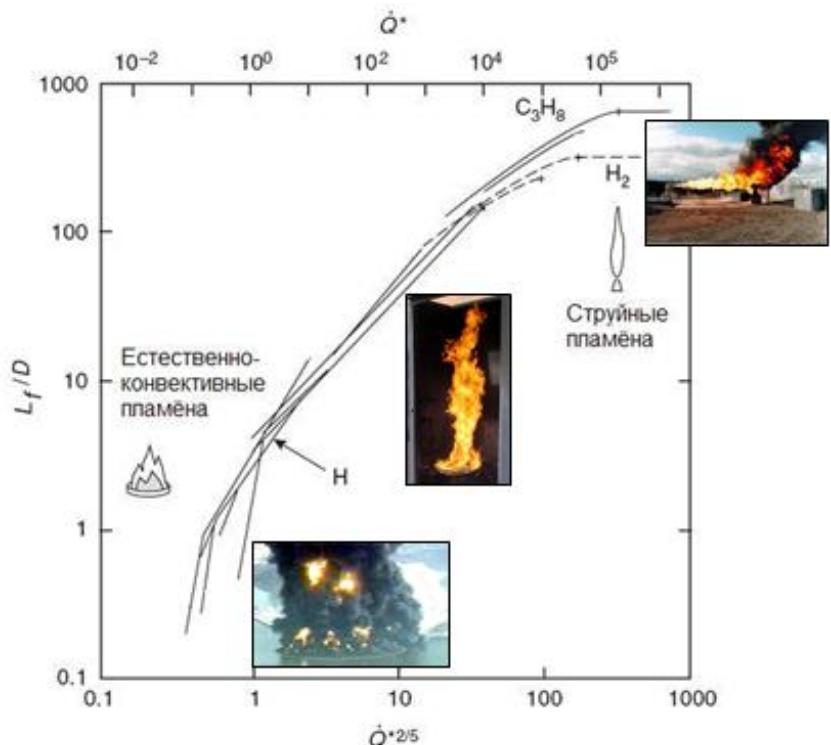


Рис. 13. Эмпирические зависимости  $L_f/D$  от безразмерной мощности тепловыделения  $Q^*$  [28, 14]. Линии – результатам измерений разных авторов. Н – формула (46)

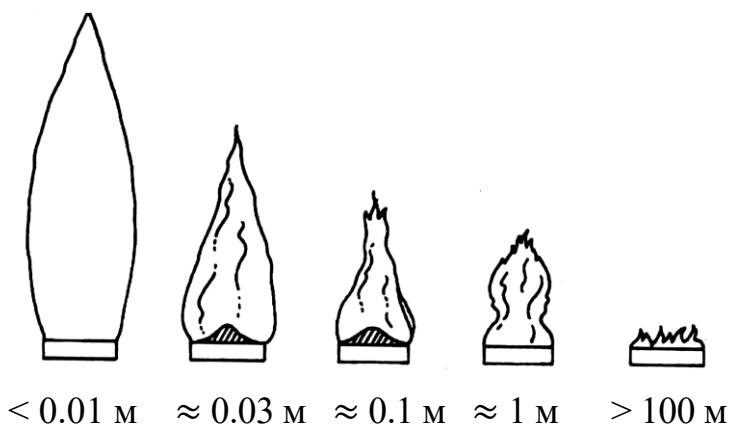


Рис. 14. Зависимость формы и внутренней структуры пламени от размеров поверхности горючего [24]

Следует отметить, что при увеличении размера очага (помимо турбулизации газового потока) также происходит переход от оптически прозрачного к оптически плотному пламени. При этом увеличивается доля энергии излучения,

поглощаемой в объёме пламени. Как эмиссия, так и поглощение энергии излучения сильно зависит от концентрации сажи, которая, в свою очередь, особенно велика, если формируется протяженная горячая область, обогащённая горючим. Перечисленные закономерности показывают сильную и нелинейную взаимосвязь аэродинамики, горения и теплообмена, определяющую выбор моделей для численных расчетов турбулентного диффузионного горения при пожаре.

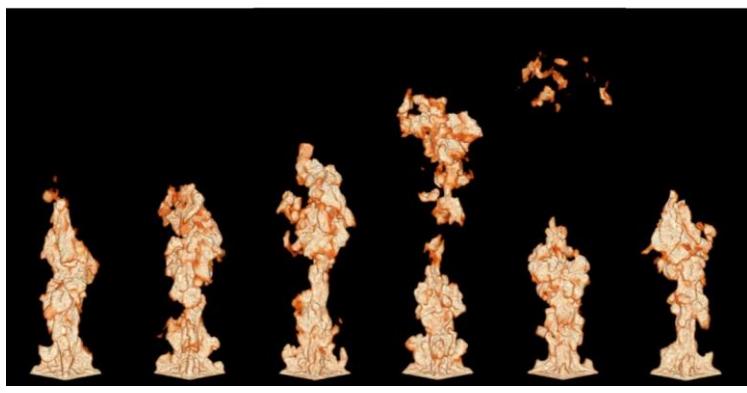


Рис. 15. Пламя над поверхностью квадратной газовой горелки (сторона квадрата 0.337 м,  $\dot{Q} = 175$  кВт). Показаны мгновенные изоповерхности объемной мощности тепловыделения 200 кВт/м<sup>3</sup>. Количество ячеек сетки 16 млн. Временной интервал между кадрами – 0.08 с [11]

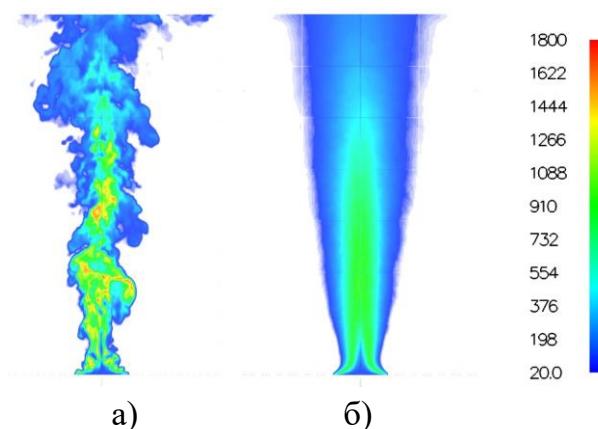


Рис. 16. Пламя над поверхностью квадратной газовой горелки (сторона квадрата 0.337 м,  $\dot{Q} = 175$  кВт). Количество ячеек сетки 16 млн. Температура в осевой плоскости: а) – мгновенная; б) – средняя. Температурная шкала (справа) в градусах Цельсия [11]

Важная особенность рассматриваемого типа пламени заключается в том, что естественно-конвективное турбулентное пламя испытывает крупномасштабные пульсации. Измерения показывают, что частота пульсаций не зависит от тепловой мощности пламени, но уменьшается с ростом размера очага. Природа этого явления заключается в том, что нижняя часть пламени подвержена гравитационной и сдвиговой неустойчивости (Релея-Тейлора и Кельвина-Гельмольца), одновременное проявление которых приводит к формированию крупных тороидальных вихрей вблизи основания пламени, которые ускоряются и сносятся к вершине пламени. Это сопровождается захватом порций холодного

воздуха из окружающей среды и их внедрением вглубь пламени. Квазипериодический отрыв вихрей наблюдается, например, при горении костра или в клубах дыма над большим пожаром. Доминирующая частота крупномасштабных пульсаций естественно-конвективного пламени обратно пропорциональна размеру очага [14]:

$$f \approx 0.5 \sqrt{\frac{g}{D}}, \text{ Гц.} \quad (47)$$

Пример численного расчета с помощью FDS показан на рис. 15, где представлен один период пульсационного цикла. Применение формулы (47) показывает, что в рассматриваемом случае период колебания составляет примерно 0.4 с, что согласуется с результатом численного расчёта.

Результат осреднения поля температуры по времени показан на рис. 16 (именно такое поле получается в расчёте, если турбулентность моделируется методом RANS). Отметим, что имеющиеся результаты измерений температуры и скорости, концентраций газовых компонентов и сажи представляют собой именно осреднённые величины. Приближённый анализ уравнений сохранения массы, импульса и энергии показывает (см, например, [28, 30, 36, 42, 51]), что для зоны теплового факела, который формируется над пламенем, распределения осреднённых по времени температуры и скорости газа вдоль вертикальной оси пламени имеют вид:

$$T(z) - T_0 \sim \frac{\dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{и} \quad w(z) \sim \frac{\dot{Q}^{1/3}}{z^{1/3}}. \quad (48)$$

Это значит, что если использовать безразмерную координату  $z/D^*$ , где  $D^* \sim \dot{Q}^{2/5}$  (см. равенство (42)), то для теплового факела должны выполняться следующие закономерности

$$T - T_0 \sim \frac{\dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} = \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{-5/3} \quad \text{и} \quad \frac{w}{\dot{Q}^{1/5}} \sim \frac{\dot{Q}^{2/15}}{z^{1/3}} = \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{-1/3}. \quad (49)$$

Важно отметить, что зависимости (49) обобщают результаты для пламен с разными размерами очага и значениями мощности тепловыделения. Поэтому как экспериментальные, так и расчётные данные для данного вида пламени представляют в координатах, представленных в (49). Экспериментальные данные из работы [36] (B.J. McCaffrey, 1979) приведены на рис. 17. Эти и другие экспериментальные данные группируются вблизи следующих зависимостей:

$$T - T_0 = \frac{T_0}{2g} \left( \frac{k}{C} \right)^2 \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2n-1}, \quad (50)$$

$$\frac{w}{\dot{Q}^{1/5}} = k \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^n, \quad (51)$$

где  $C = 0.9$ , а значения  $k$  и  $n$  приведены в табл. 1 ([36], стр. 8).

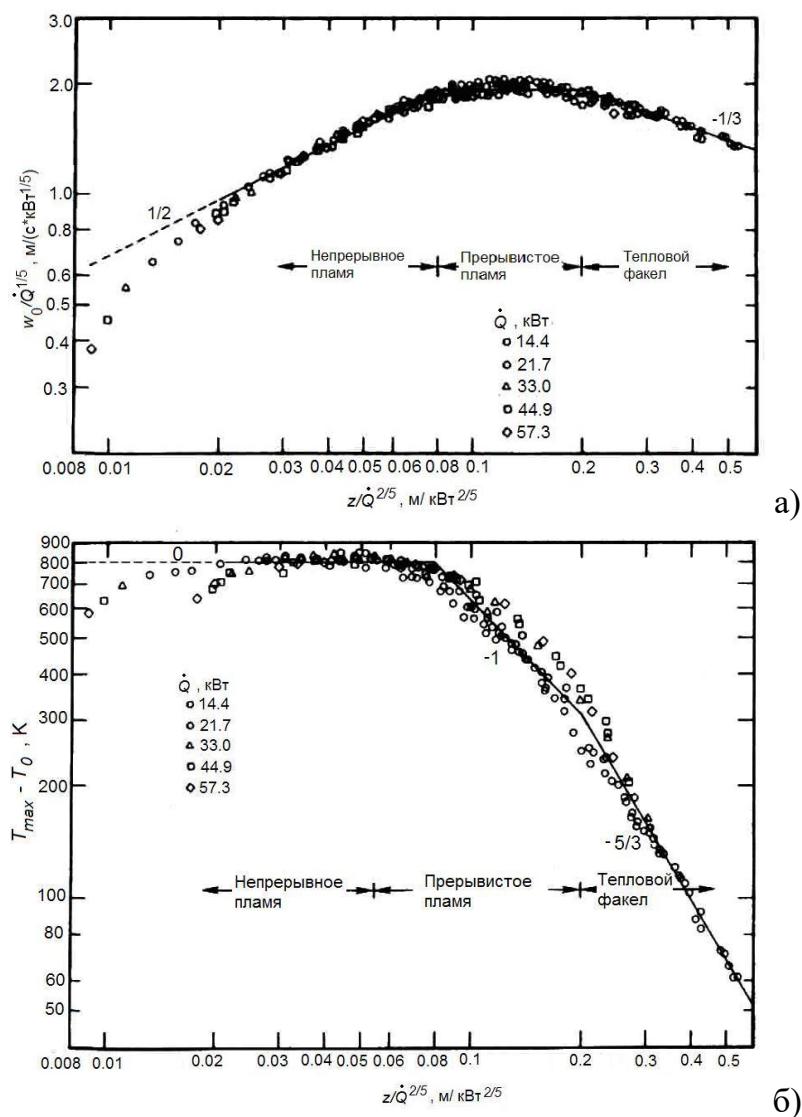


Рис. 17. Результаты измерений зависимости средней скорости (а) и температуры<sup>7</sup> (б) на оси естественно-конвективного турбулентного диффузионного пламени в неподвижной атмосфере (метан, квадратная горелка 30 см) [36] (B.J. McCaffrey, 1979)

#### Таблица 10

**Табл. 1. Аппроксимация экспериментальных данных [36] (B.J. McCaffrey, 1979)**

$z/\dot{Q}^{2/5}$ , м/кВт <sup>2/5</sup>	$k$	$n$
--	-----	-----

<sup>7</sup> Экспериментальные данные в работе [36] представлены показаниями термопар. Температура газа в пламени может быть существенно выше из-за теплопотерь (в основном лучистых) с поверхности термопары. Это подтверждается более поздними измерениями [49].

Непрерывное пламя	< 0.08	6.8 м <sup>1/2</sup> /с	1/2
Прерывистое пламя	0.08-0.2	1.9 м/(с·кВт <sup>1/5</sup> )	0
Тепловой факел	> 0.2	1.1 м <sup>4/3</sup> /(с·кВт <sup>1/3</sup> )	-1/3

Наконец, длительное воздействие теплового потока вызывает деформацию и разрушение строительных конструкций.

Оценка опасности теплового излучения и определение безопасных расстояний делают необходимым вычисление лучистого теплового потока, создаваемого пламенем. Если размер пламени значительно меньше расстояния до облучаемого объекта, то простую приближённую оценку падающего теплового потока можно получить, используя *метод точечного источника*:

$$q''_r = \frac{f_r \dot{Q}}{4\pi R^2}, \quad (52)$$

где  $f_r$  – доля излучённой энергии,  $R$  – расстояние от источника излучения до облучаемого объекта. При вычислении расстояния  $R$  в качестве источника излучения следует взять точку, расположенную на половине высоты пламени (для определения которой используется формула (46)). Равенство (52) предполагает, что мощность источника составляет  $f_r \dot{Q}$ , лучистый тепловой поток равномерно распределяется по площади сферы радиусом  $R$ , а облучаемая поверхность перпендикулярна направлению на источник. Численные значения доли излучённой энергии, используемые в FDS для разных горючих, приведены в табл. 11.

*Таблица 11*  
**Доля излученной энергии для разных горючих [55]**

Горючее	$f_r$	Горючее	$f_r$
ACETONE	0.27	METHANE	0.20
ACETYLENE	0.49	METHANOL	0.16
BENZENE	0.60	N-DECANE	0.40
BUTANE	0.30	N-HEPTANE	0.40
DODECANE	0.40	N-HEXANE	0.40
ETHANE	0.25	N-OCTANE	0.40
ETHANOL	0.25	PROPANE	0.30
ETHYLENE	0.25	PROPYLENE	0.37
HYDROGEN	0.20	TOLUENE	0.40
ISOPROPANOL	0.29	Остальные	0.35

### 3.3. Применение FDS

#### 3.3.1. Эмиссия, перенос и поглощение теплового излучения

Используемый в FDS метод расчёта эмиссии, переноса и поглощения теплового излучения<sup>8</sup> излагается в разделе П1.1.5. Расчёт теплового излучения можно отключить, если поместить параметр RADIATION = .FALSE. в группу &RADI. В задачах, где тепловым излучением можно пренебречь, это позволит сэкономить до 20% вычислительного времени.

Основными участниками лучистого теплообмена являются продукты сгорания, а именно сажа и трёхатомные молекулы воды и углекислого газа, в то время как двухатомные газы (кислород и азот) прозрачны для инфракрасного излучения. По умолчанию в расчётах используется эффективный коэффициент поглощения смеси продуктов сгорания, не зависящий от длины волны. Такой подход называют приближением «серой» среды. Использование этого приближения оказывается оправданным, если основной вклад в излучение вносит сажа, имеющая гладкий спектр (в отличие от селективного спектра газовых компонентов). Более сложный подход, также реализованный в FDS, учитывает зависимость коэффициентов поглощения CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O от длины волны. При этом принимается во внимание, что коэффициенты поглощения существенно отличаются от нуля лишь внутри определённых диапазонов длин волн (полос), границы которых зависят от температуры. Это учитывается в модели широкой полосы, которая активируется, если в группе &RADI указан параметр WIDE\_BAND\_MODEL = .TRUE.

Как при использовании приближения серой среды, так и в рамках модели широкой полосы коэффициенты поглощения зависят от температуры и концентрации компонентов. Эти зависимости вычисляются с помощью специальной процедуры RadCal [26]. Для серой среды решается одно уравнение переноса энергии излучения. При использовании модели широкой полосы количество решаемых уравнений переноса энергии излучения совпадает с числом рассматриваемых полос в спектре (в FDS используется от 6 до 9 полос), а вычислительные

---

<sup>8</sup> Основы теории теплового излучения и методы расчёта радиационного теплопереноса приведены в учебном пособии [18].

затраты на расчёт лучистого теплообмена возрастают пропорционально числу рассматриваемых полос.

Для расчёта эмиссии теплового излучения в FDS используется важное допущение об известной и наперёд заданной доле излучённой энергии  $f_r$  (доля мощности тепловыделения, которая излучается пламенем). Это значит, что даже если разрешаемая на сетке температура значительно отличается от реальной, модель воспроизводит тот уровень эмиссии теплового излучения, который соответствует заданным значениям  $f_r$  и  $\dot{Q}$ . FDS обеспечивает заданную долю излученной энергии для всей расчётной области в целом. При этом локальная эмиссия теплового излучения пропорциональна величине  $C\sigma\tilde{T}^4$ , где  $\tilde{T}$  – температура, разрешаемая на сетке, а  $C$  – калибровочный коэффициент, обеспечивающий требуемое значение интегральной доли излученной энергии.

Численное значение доли излучённой энергии коррелирует с количеством сажи, которое образуется при горении данного вида горючего. Значения доли излучённой энергии, используемые в FDS по умолчанию, приведены в табл. 11. Задать другое значение можно, используя параметр RADIATIVE\_FRACTION в группах &REAC или &COMB<sup>9</sup>.

Для дискретизации телесного угла в FDS по умолчанию используется 104 угловых направления. Пространственное разрешение можно изменить, задав требуемое значение параметра NUMBER\_RADIATION\_ANGLES в группе &RADI.

Чтобы уменьшить объём вычислений, расчёт полей интенсивности теплового излучения повторяется через три шага по времени для одного из пяти угловых направлений. Это значит, что полное обновление полей интенсивности теплового излучения происходит через каждые 15 шагов по времени. Чтобы обновление происходило чаще, можно изменить значения параметров TIME\_STEP\_INCREMENT и ANGLE\_INCREMENT в группе &RADI. Это может существенно замедлить расчет.

---

<sup>9</sup> Отметим, что в работах [45] (A. Snegirev et al., 2018) и [9] (Е.А. Кузнецов, 2020) допущение о наперёд заданной доле излученной энергии не используется, а эмиссия теплового излучения вычисляется по локальным значениям температуры, концентрации газообразных продуктов сгорания и сажи, разрешаемым на сетке. При этом оказывается, что необходима дополнительная подсеточная модель, которая учитывает влияние неразрешаемых на сетке турбулентных пульсаций температуры и тонких зон реакции.

### 3.3.2. Расчетная область и расчётная сетка

Результаты численного расчёта в значительной степени определяются формой и размерами расчётной области и расчётной сеткой. Если рассматривается горение в неограниченном пространстве, то размеры расчетной области должны быть достаточными для того, чтобы не влиять на результаты расчетов. При этом высота расчетной области должна быть существенно больше, чем высота пламени, оценку для которой даёт равенство (46). При выполнении данного задания, в котором рассматривается локальный очаг пожара в неограниченном пространстве, расчётную область зададим в форме куба, сторона которого вдвое превышает высоту пламени. Отметим также, что если рассматривается горение в ограниченном пространстве, то вертикальные границы расчётной области не следует совмещать с сечениями проёмов, открытых в окружающую среду.

Размер ячеек сетки должен быть выбран так, чтобы разрешать как можно большую часть спектра турбулентных пульсаций. В то же время использование слишком малого шага по времени может сделать длительность расчёта недопустимо большой. Для оценки качества расчетных сеток исследуют сеточную сходимость: размер ячейки сетки уменьшают до тех пор, пока изменение результатов расчётов не станет достаточно малым.

Практический критерий для выбора размера ячеек сетки заключается в том, чтобы этот размер был намного меньше характерного для данной задачи пространственного масштаба  $D^*$ , который определяется равенством (42). Опыт показывает [55], что на длину  $D^*$  должно приходиться не менее 10-12 ячеек расчетной области:  $D^*/\Delta x > 10$ . Результаты расчетов естественно-конвективных пламен при разных значениях  $D^*/\Delta x$  приведены в документации FDS [54].

Рекомендуется использовать такие размеры ячеек, при которых их форма близка к кубической. Использование слишком вытянутых ячеек (если длины сторон отличаются более, чем в 2-3 раза) может снизить точность решения и привести к численной неустойчивости.

Достаточное сеточное разрешение в области наибольших градиентов (пламя, тепловой факел, приповерхностная область и др.) без пропорционального увеличения общего числа ячеек можно обеспечить, если использовать неравномерные сетки со сгущением ячеек. Сгущение должно выполняться там,

где необходимо обеспечить более высокое сеточное разрешение, например, в окрестности оси пламени.

Для построения неравномерной сетки в FDS используется трансформирующая функция  $x = f(\xi)$ , которая преобразует равномерную сетку с координатами центров ячеек  $(\xi_1, \dots, \xi_n)$  в неравномерную с координатами центров ячеек  $(x_1, \dots, x_n)$ , причём количество ячеек не изменяется. Трансформирующая функция может быть задана кусочно-линейно или с использованием полинома  $f(\xi) = c_0 + c_1\xi + c_2\xi^2 + c_3\xi^3 + \dots$  (мы рекомендуем использовать полином). Отношение размеров соседних ячеек не должно превышать 2-3.

Для координат центров ячеек неравномерной сетки FDS использует параметр PC (physical coordinate). Соответствующие координаты равномерной сетки задаются параметром CC (computational coordinate). Пусть имеется равномерная сетка со следующими параметрами:

```
&MESH    IJK=30,30,33,  
          XB= -1.5,1.5,-1.5,1.5,-0.3,3.3 /
```

Чтобы деформировать сетку, уменьшая размер ячейки при  $x = 0$  в два раза, в fds-файл нужно добавить следующие строки:

```
&TRNX    IDERIV=0, CC=0.0, PC=0.0, MESH_NUMBER=0/  
&TRNX    IDERIV=1, CC=0.0, PC=0.50, MESH_NUMBER=0/
```

Использование группы &TRNX указывает на необходимость преобразования сетки в направлении  $x$ . Степень сгущения узлов неравномерной сетки определяется значениями производных  $d^n f(\xi)/d\xi^n$ . Первая строка показывает, что значение нулевой производной (IDERIV=0) трансформирующей функции (PC) равно 0 в точке (CC) 0. Вторая строка задает значение первой производной (IDERIV=1) трансформирующей функции, которая полагается равной 0.5 в точке 0. Это значит, что  $f(0) = 0$  и  $df/d\xi(0) = 0.5$ . FDS автоматически подберет значения коэффициентов для кубического полинома  $f(\xi) = c_0 + c_1\xi + c_2\xi^2 + c_3\xi^3$  так, чтобы согласовать границы обеих сеток и обеспечить монотонность функции  $f(\xi)$ .

Результат преобразования показан на рис. 18. Поскольку количество

ячеек сетки не изменилось, то размер ячеек в направлении  $x$  уменьшился вблизи оси и увеличился на периферии расчетной области.

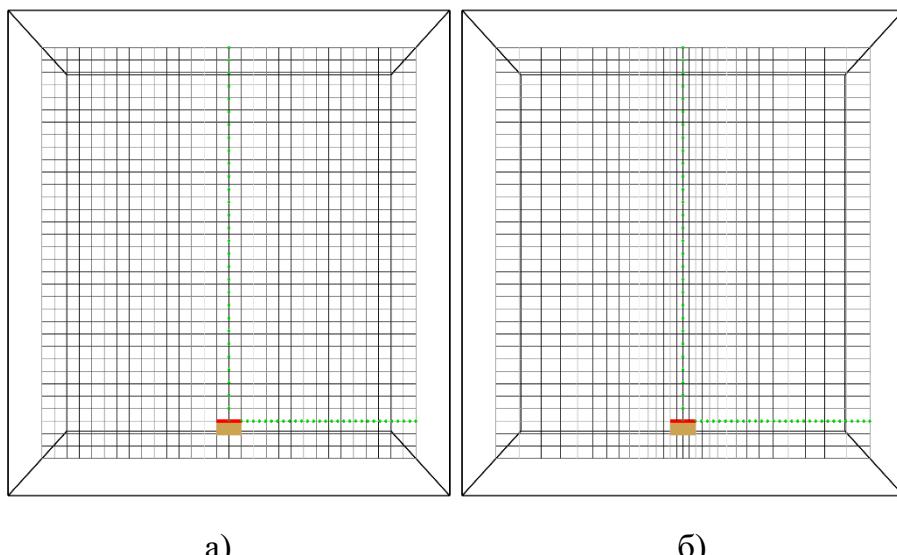


Рис. 18. Преобразование равномерной расчетной сетки (а) в сетку со сгущением к оси (б)

Для дискретизации расчтной области могут быть использованы одна или несколько сеток. Номер сетки, к которой применяется преобразование, задаётся параметром MESH\_NUMBER. Если в fds-файле задана только одна сетка, то этот параметр можно не указывать, а если сеток несколько, и преобразование применяется ко всем расчетным сеткам, то следует указать MESH\_NUMBER=0. Если же нужно трансформировать только одну сетку из нескольких, то вместо 0 необходимо указать ее номер. При этом необходимо помнить о правиле согласования сеток (грань ячейки более крупной сетки должна быть в целое число раз больше, чем грань более мелкой).

Чтобы трансформировать сетку в направлениях  $y$  и  $z$ , используют группы &TRNY и &TRNZ с тем же набором параметров.

### 3.3.3. Подготовка fds-файла

Для расчетной области, показанной на рис. 20, создадим файл Gas\_burner.fds:

```
&HEAD      CHID='Gas_burner', TITLE='Gas burner, 20 kW, Methane' /
&MESH      IJK=30,30,33, XB=-1.5,1.5,-1.5,1.5, -0.3,3 /
```

```

&TIME      T_END=30/
&DUMP      DT_DEV_C_LINE=20. /
&RADI      C_MIN=0.5 /
&REAC      FUEL='METHANE', RADIATIVE_FRACTION=0.17/
&SURF      ID='burner', HRRPUA=160., TMP_FRONT=750., COLOR='RED' /
&OBST      XB=-0.1,0.1,-0.1,0.1,-0.10,0.00, SURF_IDS='burner',
            'INERT', 'INERT' /
&VENT      MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT      MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT      MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT      MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT      MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT      MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&DEVC      ID='tmp', XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,3.0, POINTS=30,
            QUANTITY='THERMOCOUPLE', Z_ID='Height' /
&DEVC      ID='vel', XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,3.0, POINTS=30,
            QUANTITY='W-VELOCITY', HIDE_COORDINATES=.TRUE. /
&DEVC      ID='rad', XB= 0.1,1.5,0.0,0.0,0.0,0.0, POINTS=30,
            QUANTITY='W-VELOCITY' /
&SLCF      PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&TAIL /

```

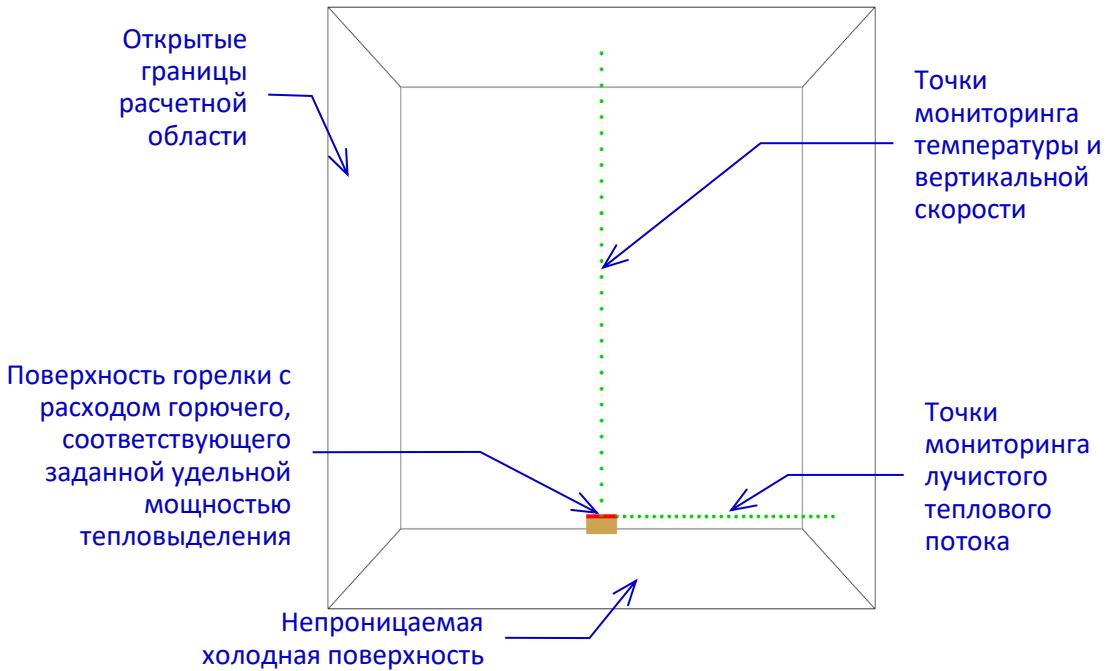


Рис. 19. Расчетная область, заданная в Gas\_burner.fds

Группа &HEAD содержит название и описание задачи:

```

&HEAD    CHID='Gas_burner',
             TITLE='Gas burner, 20 kW, Methane'/

```

Расчетная область имеет размеры  $3 \times 3 \times 3.3$  м, общее число ячеек составляет  $30 \times 30 \times 33 = 29\,700$ :

```

&MESH   IJK=30,30,33,
             XB=-1.5,1.5,-1.5,1.5, -0.3,3 /
&TIME   T_END=40/
&DUMP   DT_RESTART=20.0/

```

С помощью параметра DT\_DEV\_C\_LINE задается продолжительность промежутка времени, на котором выполняется осреднение данных, записываемых в файлы CHID\_devc\_line.dvc:

```

&DUMP   DT_DEV_C_LINE=20/

```

В группе &RADI зададим параметр, C\_MIN, который используется при вычислении эмиссии теплового излучения (подробнее см. в [55, стр. 188] и ниже в разделе П1.1.5):

```

&RADI   C_MIN=0.5/

```

В группе &REAC в качестве газообразного горючего задан метан (METHANE), доля излученной энергии (RADIATIVE\_FRACTION) принимается равной 17%. Параметры этого газа включены в стандартную библиотеку FDS, поэтому теплоту сгорания, теплоемкость и теплопроводность задавать не нужно. Проверить, какие именно значения теплофизических свойств используются для метана и воздуха можно после запуска расчета в файле CHID.out (в данном случае Gas\_burner.out).

```

&REAC   FUEL='METHANE', RADIATIVE_FRACTION=0.17/

```

В группе &SURF задан новый тип граничного условия под названием ID = 'burner' с заданной удельной мощностью тепловыделения 160 кВт/м<sup>2</sup> (HRRPUA = 160) и постоянной температурой поверхности 750 °C (TMP\_FRONT = 750.). При визуализации в Smokeview эта зона будет выделена красным цветом (COLOR = 'RED'):

```

&SURF    ID='burner',
            HRRPUA=160,
            TMP_FRONT=750,
            COLOR='RED'/

```

С помощью группы &OBST создан параллелепипед, на верхней грани которого задано граничное условие (SURF\_IDS) под названием 'burner', а на нижней и на боковых гранях – условие холодной непроницаемой сетки (INERT). Площадь верхней грани, а значит площадь горелки, равна  $0.2 \times 0.2 = 0.04 \text{ м}^2$ .

```

&OBST    XB=-0.1,0.1,-0.1,0.1,-0.10,0.00,
            SURF_IDS = 'burner','INERT','INERT'/

```

Далее в нескольких группах &VENT заданы граничные условия на каждой из шести граней расчетной области (MB), которые открыты для течения газа (SURF\_ID='OPEN'):

```

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

```

В группах &DEVC запрашивается вывод температуры, регистрируемой моделью термопары<sup>10</sup> (QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'), и вертикальной составляющей скорости (QUANTITY = 'W-VELOCITY'). Значения координат XB показывают, что на отрезке с координатами от  $z = 0 \text{ м}$  до  $z = 3 \text{ м}$  размещено по 30

---

<sup>10</sup> В модели термопары учитывается отличие температуры спая от температуры окружающего газа, которое возникает из-за конечной массы пая термопары и из-за теплообмена между газом и спаем. Для расчёта температуры спая используется следующее уравнение  $(c_{TC}m_{TC}/A_{TC})dT_{TC}/dt = \varepsilon_{TC}(q_r'' - \sigma T_{TC}^4) + \alpha_{TC}(T_g - T_{TC})$ , где  $c_{TC}$ ,  $m_{TC}$ ,  $A_{TC}$  – теплоемкость материала, масса и площадь поверхности измерительного спая термопары,  $\varepsilon_{TC}$  и  $\alpha_{TC}$  – степень черноты и коэффициент теплоотдачи на поверхности спая,  $q_r''$  – радиационный тепловый поток, падающий на поверхность спая,  $T_{TC}$  и  $T_g$  – температура спая термопары и температура газа, разрешаемая на сетке. В FDS предполагается, что время тепловой релаксации спая мало и принимается  $(c_{TC}m_{TC}/A_{TC})dT_{TC}/dt = 0$ . Температура термопары  $T_{TC}$  вычисляется с помощью равенства  $\varepsilon_{TC}(q_r'' - \sigma T_{TC}^4) + \alpha_{TC}(T_g - T_{TC}) = 0$ .

точек мониторинга (POINTS) для температуры и скорости. Эти данные будут осреднены на промежутке времени, указанном выше в параметре DT\_DEVC\_LINE. Параметр Z\_ID = 'Height' используется при выводе данных в файл CHID\_line.csv. Поскольку координаты точек мониторинга для температуры и скорости совпадают, то для второй величины (скорость) координаты можно не выводить (HIDE\_COORDINATES=.TRUE.):

```
&DEVC    ID='tmp',
          XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,3.0,
          POINTS=30,
          QUANTITY='THERMOCOUPLE',
          Z_ID='Height' /

&DEVC    ID='vel',
          XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,3.0,
          POINTS=30,
          QUANTITY='W-VELOCITY',
          HIDE_COORDINATES=.TRUE. /
```

Аналогично, на отрезке от  $x = 0.1$  м до  $x = 1.5$  м размещено 30 точек мониторинга для лучистого теплового потока. Регистрируется тепловой поток, приходящий с положительного направления оси  $z$  (ORIENTATION = 3). Если бы это был реальный датчик, то можно было сказать, что его рабочая поверхность обращена вверх:

```
&DEVC    ID='rad',
          XB= 0.1,1.5,0.0,0.0,0.0,0.0,
          POINTS=30,
          QUANTITY='W-VELOCITY' /
```

В группе &SLCF запрошен вывод векторного поля скорости после чего даётся указание на окончание fds-файла:

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

### 3.4. Порядок выполнения задания

При подготовке файла `Gas_burner.fds` и выполнении задания следует проделать следующие действия.

1. По формуле (42) оценить характерный пространственный масштаб  $D^*$ .

Создать равномерную сетку в газовой фазе с размером ячеек, удовлетворяющим условию  $D^*/\Delta x = 5$  (грубая сетка). Размер расчетной области оставить без изменений.

2. Задать начальные и граничные условия:

- Доля излученной энергии (параметр `RADIATIVE_FRACTION`).
- Размер горелки (параметр `XB` в группе `&OBST`).
- Удельная мощность тепловыделения (параметр `HRRPUA`, значение которого оценивается по формуле (40)).
- Температура поверхности горелки (параметр `TMP_FRONT`).

3. Проверить наличие точек мониторинга температуры и вертикальной составляющей скорости вдоль оси пламени, а также точек мониторинга лучистого теплового потока в плоскости среза горелки. Эти данные будут выведены в файл `CHID_line.csv` (в данном случае `gas_burner_line.csv`). Формат файла приведен в табл. 12.

*Таблица 12*

**Формат файла `gas_burner_line.csv`**

m	C	m/s	
Height	tmp	vel	
Координаты (в метрах)	Величина, которая записывается в точку мониторинга	Величина, которая записывается в точку мониторинга с ID = 'vel'.	Остальные данные, запрошенные в группе <code>DEVC</code> с параметром <code>POINT</code> в порядке перечисления в <code>fds</code> -файле.
Название столбца задано в параметре <code>Z_ID</code> в группе <code>&amp;DEVC</code>	мониторинга ID = 'tmp'. В данном случае – температура (в градусах Цельсия)	В данном случае – вертикальная скорость (метры в секунду)). Координаты совпадают с координатами для ID = 'tmp' и не выводятся в файл, т.к. указан параметр <code>HIDE_COORDINATES = .TRUE.</code> .	Сначала указывается столбец с координатами, затем столбец со значениями.

В файл CHID\_line.csv будут вынесены данные только для тех групп &DEVC, для которых задан параметр POINTS.

**Замечание:** Этот же параметр указывает на необходимость осреднения.

В отсутствие параметра POINT данные для групп &DEVC без выводятся в файл CHID\_DEV.CSV без осреднения.

4. Выполнить расчет. Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными для распределений температуры и скорости на рис. 17 (использовать (50) и (51)) и оценками радиационного потока по формуле (52). Если рассогласование велико, следует проверить постановку задачи.

5. Выполнить второй расчет для сетки со сгущением к оси в направлениях X и Y. Размер ячейки по X и Y вблизи оси задать в 2 раза меньше, чем для начальной равномерной сетки (при сохранении общего числа ячеек сетки). Оценить значение  $D^*/\Delta x$  вблизи оси пламени.

6. Выполнить третий расчет для сетки со сгущением к оси в направлениях X и Y, в котором количество ячеек по каждому направлению увеличено в 1.5 раза. Размер ячейки вблизи оси должен оказаться в 3 раза меньше, чем для начальной равномерной сетки. Оценить значение  $D^*/\Delta x$  вблизи оси пламени.

7. На основании трех расчетов сделать вывод о влиянии сеточного разрешения на результаты расчетов. Построить графики распределения температуры и вертикальной составляющей скорости вдоль оси пламени, а также лучистого теплового потока в горизонтальном направлении. Использовать координаты, представленные соотношениями (49). На графиках привести экспериментальные линии (50), (51) и результаты приближённого расчёта по формуле (52).

8. С помощью Smokeview визуализировать пламя изоповерхности объемной мощности тепловыделения. Оценить среднюю высоту пламени. Сохранить несколько картинок, показывающих один период пульсаций пламени. Визуализировать поле температуры и скорости. Как влияет сеточное разрешение?

10. Результаты и их обсуждение оформить в виде отчёта.

### 3.5. Пример расчета

Рассмотрим естественно-конвективное турбулентное пламя над квадратной горелкой, площадь поверхности которой составляет  $A = 0.3 \times 0.3 = 0.09 \text{ м}^2$ .

Зададим расход горючего газа (метан), соответствующий тепловой мощности  $\dot{Q} = 40$  кВт. Параметры задачи представлены в табл. 13. Для данного пламени имеем  $Q^* = 0.51$ .

Таблица 13

**Параметры задачи**

							Расчетная сетка			
$\dot{Q}$ , кВт	$A$ , $\text{м}^2$	$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}A}$ , м	$Q''$ , кВт/ $\text{м}^2$	$f_r$	$T_{fuel}$ , °C	$D^*$ , м	Сгущение к оси	$D^*/\Delta x$	$\Delta x$	Общее число ячеек
40	0.09	0.34	444	0.26	630	0.26	Нет	5	5	46 656
							Да	10	2.5	46 656
							Да	15	1.5	157 464

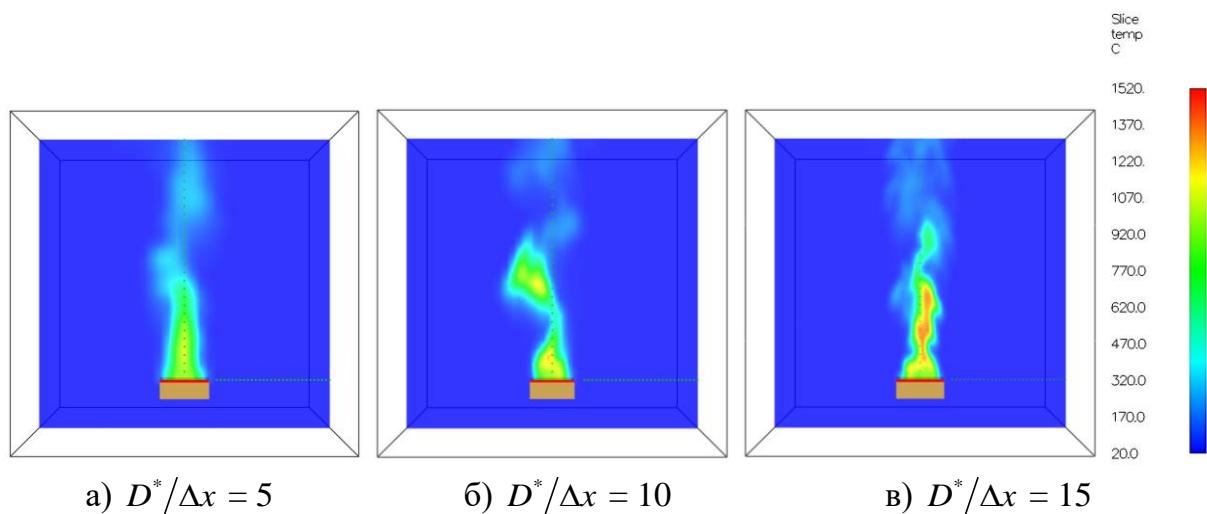


Рис. 20. Поля мгновенной разрешенной температуры газа в осевой плоскости

На рис. 20 приведены поля мгновенных значений разрешенной температуры в центральной плоскости пламени для трех расчётных сеток в один и тот же момент времени. Уменьшение размера ячейки сетки позволяет воспроизвести более мелкие вихри в пламени. На рис. 21 показан один период пульсаций пламени, рассчитанного на самой мелкой сетке. Видно, что в расчете воспроизводится периодический отрыв фрагмента пламени, который происходит из-за формирования тороидального вихря вокруг пламени (подробнее об этом явле-

нии см. в разделе 3.2). В соответствии с экспериментальными данными (формула (47)), частота крупномасштабных пульсаций пламени составляет  $f = 0.5\sqrt{g/D} \approx 2.7$  Гц. Это соответствует периоду колебаний  $\approx 0.37$  с и согласуется с длительностью одного цикла, представленного на рис. 21.

Средняя высота пламени, визуально определенная по рис. 21, составляет  $L_f \approx 0.75$  м, что хорошо согласуется с оценкой по эмпирической формуле (46):  $L_f = 0.7$  м.

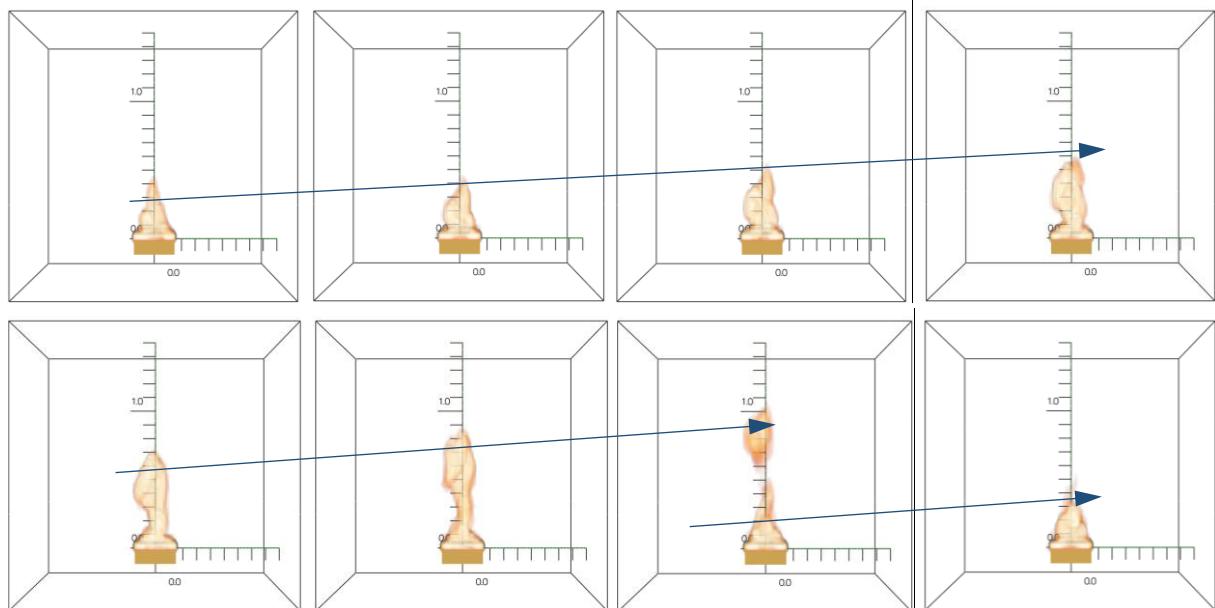
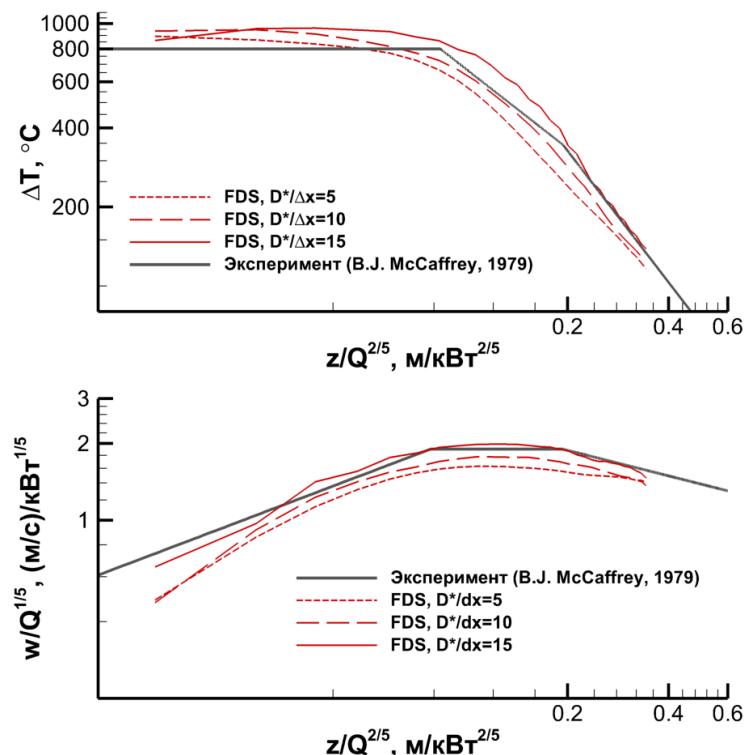


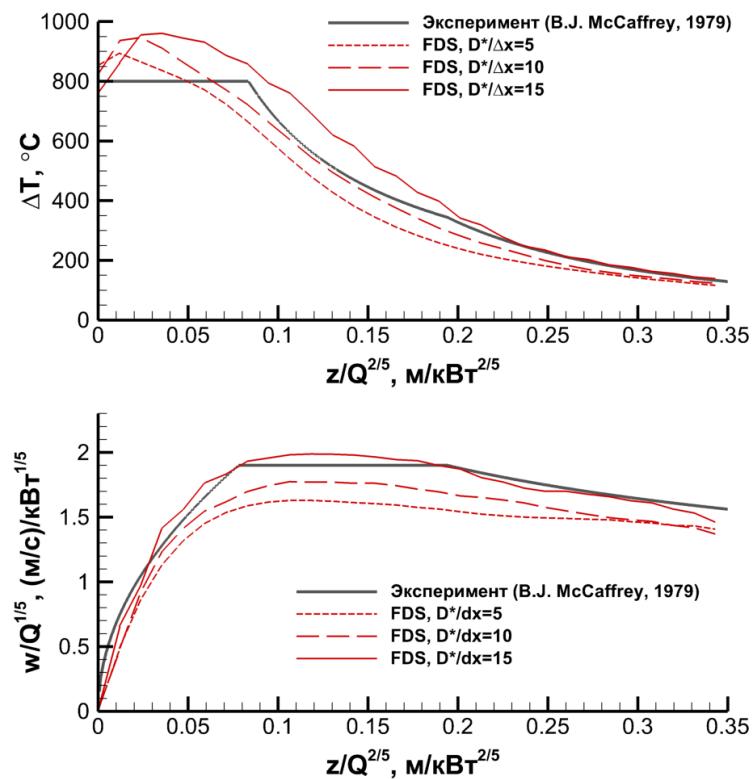
Рис. 21. Пламя над поверхностью квадратной газовой горелки, визуализированное мгновенными изоповерхностями объемной мощности тепловыделения 200 кВт/м<sup>3</sup>. Временной интервал между кадрами 0.04 с

На рис. 22 осредненные по времени температуры и скорости на оси пламени сравниваются с эмпирическими зависимостями (50) и (51) с коэффициентами из табл. 1. Представлены численные расчёты, выполненные на трех сетках (параметры сеток приведены в табл. 13).

Видно, что наиболее подробная сетка с  $D^*/\Delta x = 15$  вблизи оси пламени позволяет получить наилучшее согласие с экспериментальными корреляциями. Отметим также, что расчет предсказывает более высокую температуру в зоне непрерывного пламени<sup>7</sup>.



а) Логарифмический масштаб осей



б) Линейный масштаб осей

Рис. 22. Распределение осредненных по времени температуры (слева) и вертикальной составляющей скорости (справа) вдоль оси пламени. Экспериментальные кривые соответствуют корреляциям (50) и (51) с коэффициентами из табл. 1. Масштаб осей: а) – логарифмический; б) – линейный

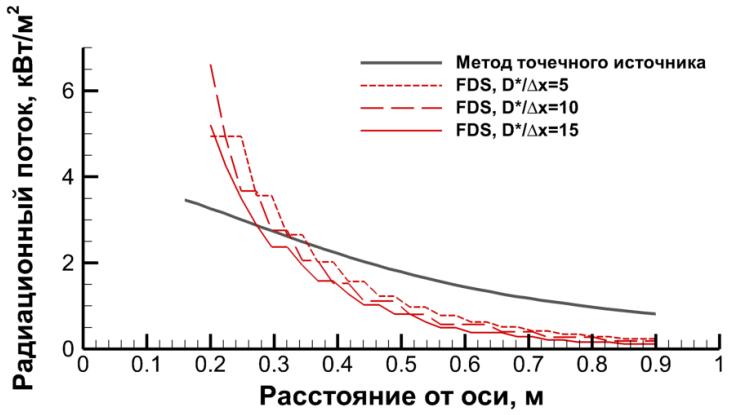


Рис. 23. Зависимость радиационного теплового потока в горизонтальной плоскости на уровне поверхности горелки от расстояния до оси пламени

На рис. 23 показаны значения среднего радиационного теплового потока в плоскости среза горелки. Ступеньки на линиях обусловлены размерами ячеек сетки и дискретностью направлений, в которых учитывается распространение энергии теплового излучения. Видно, что модель точечного источника (52) предсказывает более медленное снижение теплового потока, чем численный расчет.

## 4. ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЛАМЯ В ПОМЕЩЕНИИ С ПРОЕМОМ

Горение в помещении с проемом протекает в условиях взаимодействия пламени и теплового факела с перекрытием и стенами. При этом формируется припотолочный слой, содержащий горячие продукты сгорания, и имеет место газообмен через открытый проём. В зависимости от интенсивности такого газообмена мощность тепловыделения в пламени определяется либо скоростью газификации горючих материалов (избыток кислорода), либо расходом воздуха, поступающего в помещение через проём (недостаток кислорода). Первый режим называют *пожаром, регулируемым нагрузкой* (ПРН), а второй – *пожаром, регулируемым вентиляцией* (ПРВ).

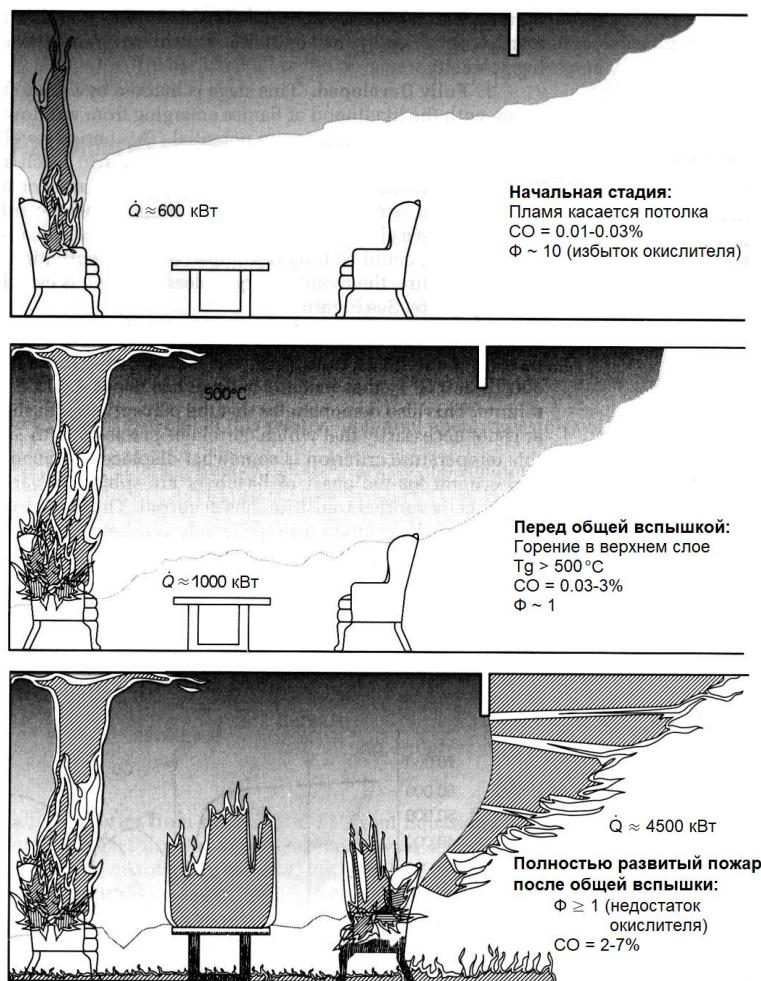


Рис. 24. Стадии пожара в помещении с проемом [42] (J.G. Quintiere, 1997)

Накопление горячих продуктов сгорания в припотолочном слое приводит к формированию сильного радиационного теплового потока, падающего на поверхности конструкций и горючих материалов. Этот тепловой поток ускоряет

прогрев и термическое разложение горючих материалов и, следовательно, увеличивает скорость образования продуктов сгорания. Возникающая положительная обратная связь может привести к наиболее опасному сценарию развития пожара, при котором происходит быстрый охват пламенем поверхностей всех горючих материалов, имеющихся в помещении. Это физическое явление называют *общей вспышкой* (flashover). После общей вспышки пожар переходит в режим, регулируемый вентиляцией, а выходящий через проём газовый поток содержит несгоревший горючий газ, который воспламеняется и интенсивно горит за пределами помещения (рис. 24).

**Замечание:**

Горение в ограниченном пространстве может протекать в одном из двух режимов. Их реализация зависит от того, достаточно ли расход воздуха, поступающего в помещение через проёмы, для полного окисления газообразных продуктов термического разложения пожарной нагрузки.

По мере развития пожара происходит переход от пожара, регулируемого нагрузкой (ПРН) к пожару, регулируемому вентиляцией (ПРВ).

Развитие пожара в помещении условно делится на три стадии: начальная (локальный очаг, избыток окислителя), полностью развитый пожар (совместное горение пожарной нагрузки, недостаток окислителя) и затухание (исчерпание пожарной нагрузки или окислителя). Как правило, переход от начальной стадии к полностью развитому пожару протекает как кратковременное событие, что и позволяет обозначать его как общую вспышку. Общая вспышка не происходит, и пожар не переходит в полностью развитую стадию, если локальный очаг затухает на начальной стадии из-за исчерпания горючего в очаге до воспламенения других предметов, а пламя не распространяется по поверхностям.

Затухание полностью развитого пожара при вскрытых проемах начинается после выгорания значительной части горючих материалов. Если же затухание произошло из-за исчерпания окислителя в закрытом помещении при высокой температуре и интенсивном термическом разложении пожарной нагрузки, то создаются условия для *повторной вспышки* (backdraft), которая происходит при последующем вскрытии проемов и носит взрывной, чрезвычайно опасный характер. Перечисленные физические явления показывают многообразие возможных сценариев пожара в помещении.

В данной главе рассматривается упрощённый сценарий, в котором горение обеспечивается подачей горючего газа с фиксированным расходом. Это значит, что отмеченная выше тепловая обратная связь разрывается. Поэтому рассматриваемый сценарий приблизённо воспроизводит начальную стадию пожара до общей вспышки (режим ПРН).

#### 4.1. Постановка задачи

Рассматривается помещение размером  $2.8 \times 2.8 \times 2.18$  м с проёром в стене (рис. 25). Стены и потолок покрыты керамическим теплоизоляционным материалом. Очаг пожара представляет собой круглую горелку диаметром 30 см, через пористую поверхность которой подается горючий газ (метан) с заданным массовым расходом.

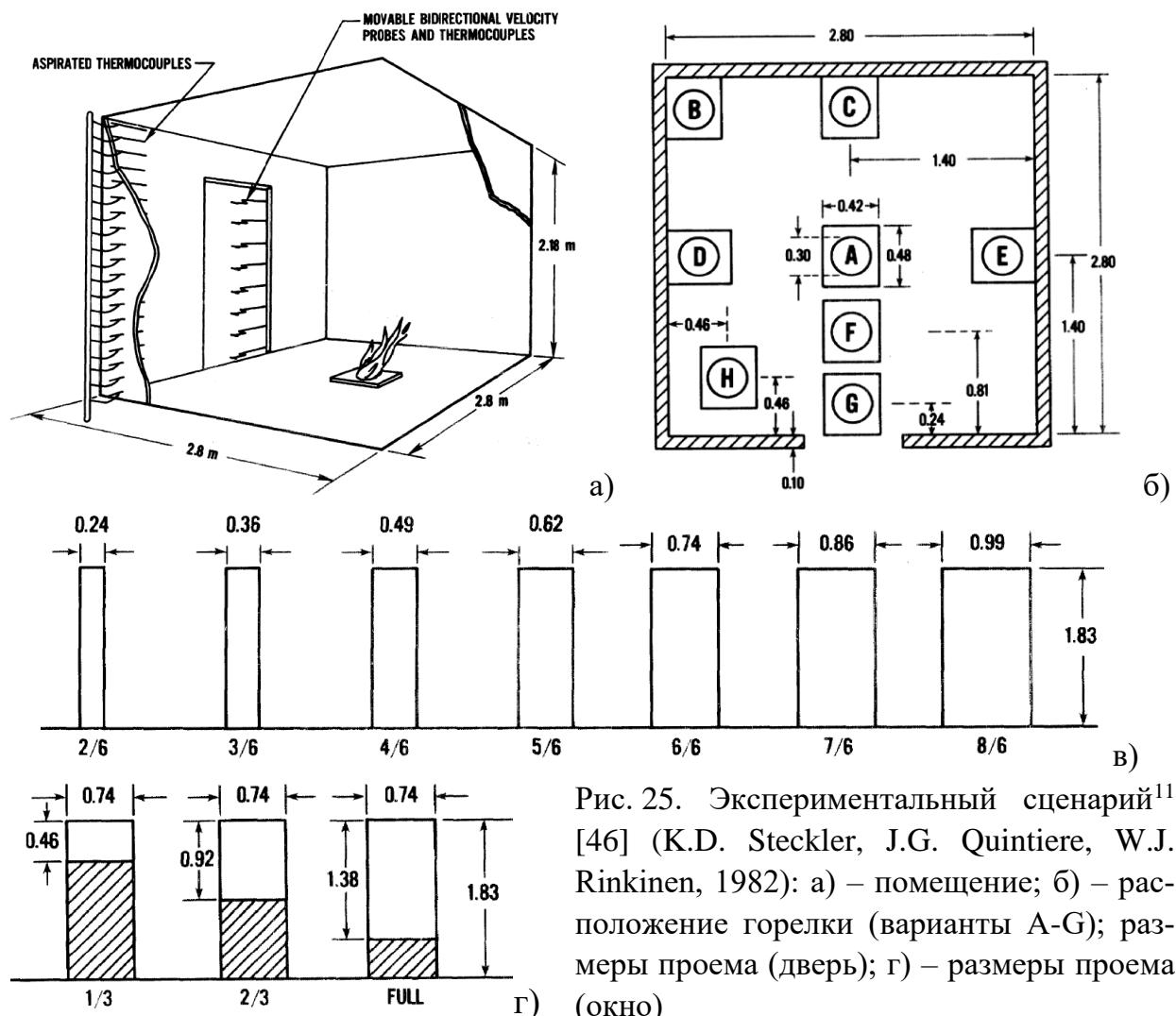


Рис. 25. Экспериментальный сценарий<sup>11</sup> [46] (K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, 1982): а) – помещение; б) – расположение горелки (варианты А-Г); размеры проема (дверь); г) – размеры проема (окно)

<sup>11</sup> В [54] сообщается, что значение высоты помещения 2.18 м, указанное в отчете [46], является опечаткой. Высота экспериментального помещения составляла 2.13 м. Кроме того,

Горение продолжается в течение продолжительного промежутка времени, достаточного для установления стационарного режима.

*Таблица 14*

**Результаты измерений температуры и скорости газа на вертикальной оси проема. Расположение очага А (центр) [46]**

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5		
Test 14, Table B-8		Test 12, Table B-5		Test 17, Table B-13		Test 19, Table B-18		Test 20, Table B-19		
62.9 кВт Дверь 6/6		62.9 кВт Дверь 4/6		62.9 кВт Дверь 8/6		31.6 кВт Дверь 6/6		105.3 кВт Дверь 6/6		
<i>z</i> , м	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с
1.767	128.58	2.15	139.99	2.51	107.27	2.19	86.01	1.65	181.47	2.67
1.653	124.36	1.62	135.24	1.92	103.21	1.48	83.66	1.19	176.06	1.96
1.539	122.18	1.37	133.63	1.70	99.33	1.21	82.38	1.04	171.46	4.69
1.425	120.48	1.15	131.56	1.45	97.18	0.96	81.03	0.85	170.96	1.42
1.311	117.03	0.91	130.29	1.19	88.40	0.77	77.88	0.62	164.62	1.12
1.197	108.55	0.76	126.60	0.95	66.79	0.51	72.77	0.51	155.00	0.94
1.083	75.98	0.39	110.53	0.72	43.93	0.24	50.76	0.26	108.62	0.57
0.969	43.44	-0.20	53.71	0.07	29.30	-0.23	35.27	-0.23	64.04	-0.11
0.855	31.61	-0.47	24.74	-0.58	24.24	-0.43	31.23	-0.37	39.80	-0.52
0.740	30.88	-0.60	23.54	-0.72	23.70	-0.47	30.76	-0.42	37.81	-0.64
0.627	31.90	-0.64	24.29	-0.81	24.23	-0.57	31.45	-0.50	38.68	-0.75
0.513	31.75	-0.73	23.90	-0.91	24.14	-0.58	31.06	-0.55	38.63	-0.83
0.399	30.57	-0.74	23.05	-0.96	23.15	-0.61	30.50	-0.56	37.06	-0.84
0.285	30.66	-0.77	22.85	-1.03	23.33	-0.62	30.14	-0.60	37.17	-0.90
0.171	32.84	-0.79	24.27	-1.07	24.79	-0.63	31.35	-0.63	39.98	-0.92
0.057	33.40	-0.82	24.29	-1.09	25.00	-0.65	31.50	-0.65	39.92	-0.93

При выполнении данного задания требуется выполнить расчёт полей скорости и температуры газа в помещении и сравнить результаты расчёта с результатами измерений, а также со значениями расхода горячего газа через проем и температуры припотолочного слоя, вычисленными с помощью приближённой

---

в [54] приводится информация о материалах стен, отсутствующая в [46]: стены и потолок – керамическая волокнистая плита (12.7 мм) на листах алюминия (0.66 мм), каркас из деревянных брусков; пол – плита из силиката кальция (19 мм) поверх листов фанеры (12.7 мм).

теории. Варианты задания отличаются расходами горючего газа, положением горелки, размерами и формой проёма, а также материалом отделки. В табл. 14 и 15 приведены экспериментальные профили температуры и скорости вдоль вертикальной оси проема для нескольких из 55 экспериментов, описание и полные результаты которых приводятся в работе [46] (K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, 1982).

*Таблица 15*

**Результаты измерений температуры и скорости газа  
на вертикальной оси проема. Расположение очага С ( дальняя стена) [46]**

	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8	Вариант 9	Вариант 10	
	Test 514, Table B-35	Test 544, Table B-36	Test 512, Table B-37	Test 542, Table B-38	Test 610, Table B-39	
	62.9 кВт Дверь 2/6	62.9 кВт Дверь 3/6	62.9 кВт Дверь 4/6	62.9 кВт Дверь 5/6	62.9 кВт Дверь 6/6	
<i>z</i> , м	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с	<i>T</i> , °C	<i>v</i> , м/с
1.767	200.84	3.22	167.52	2.82	167.04	2.46
1.653	199.82	2.86	164.25	2.34	164.68	1.99
1.539	191.37	2.57	159.66	2.00	160.04	1.64
1.425	191.71	2.35	154.93	1.74	153.01	1.38
1.311	191.15	1.98	150.71	1.41	144.36	1.08
1.197	185.27	1.52	121.33	1.01	83.16	0.58
1.083	146.98	1.06	55.08	0.45	50.05	0.27
0.969	51.77	0.25	14.60	-0.35	28.64	-0.29
0.855	10.36	-0.64	8.57	-0.58	22.52	-0.46
0.740	9.58	-0.81	8.23	-0.71	21.70	-0.56
0.627	11.46	-1.04	8.83	-0.84	23.37	-0.68
0.513	11.64	-1.16	8.77	-0.92	23.48	-0.77
0.399	8.77	-1.26	7.70	-0.98	21.67	-0.82
0.285	9.46	-1.34	8.22	-1.03	21.82	-0.87
0.171	11.44	-1.44	9.48	-1.08	23.45	-0.92
0.057	11.56	-1.47	9.53	-1.13	23.60	-0.93
					23.12	-0.80
					21.25	-0.70

В табл. 16 приведены измеренные расходы воздуха, поступающего в помещение, и горячего газа, выходящего через проем, положение нейтральной плоскости и нижней границы припотолочного слоя, средние температуры ниж-

него и верхнего слоя, а также температуры окружающей среды. Эти данные следует использовать для валидации результатов численных расчётов и приближенных оценок.

*Таблица 16*

**Характеристики стационарных режимов горения в помещении с проемом [46]**

Test [46]	Расход воздуха, кг/с	Расход газа, кг/с	Высота нейтральной плоскости	Высота температурного интерфейса, м	Средняя температура горячего слоя, °C	Средняя температура холодного слоя, °C	Температура окружающей среды, °C
	$\dot{m}_{air}$	$\dot{m}_g$	$h_{in}/H$	$h_*$	$T_U$	$T_L$	$T_\infty$
14	0.563	0.571	0.562	0.97±0.23	129	48	29
12	0.457	0.459	0.531	0.86±0.23	141	50	22
17	0.677	0.701	0.582	1.09±0.23	109	36	22
19	0.446	0.461	0.569	0.97±0.11	86	41	29
20	0.624	0.630	0.547	0.97±0.11	183	69	35
514	0.243	0.248	0.528	1.03±0.17	209	53	9
544	0.340	0.343	0.560	1.09±0.23	173	34	7
512	0.388	0.393	0.566	1.14±0.17	173	46	21
542	0.441	0.440	0.577	1.20±0.23	160	41	20
610	0.488	0.498	0.579	1.26±0.17	152	36	18

## 4.2. Теоретический анализ

### 4.2.1. Газообмен через проём

Рассмотрим помещение с проёмом, вертикальное сечение которого показано на рис. 26. Приближённый метод расчёта массовых расходов газа через проем использует допущение об интенсивном перемешивании газа в помещении. Если это допущение справедливо, то можно положить, что температура и

плотность газа равномерно распределены по внутреннему объёму. Соответствующую модель называют среднеобъемной или *однозонной*<sup>12</sup>.

Причиной движения газа через проём является перепад давления по разные стороны от сечения проема. Поскольку скорость движения газа мала, можно полагать, что распределение давления по высоте приближённо описывается уравнением  $-dP/dx + \rho g = 0$ , записанным для неподвижного газа. Пусть температура окружающей среды и температура газа в помещении равны  $T_0$  и  $T_g$ . С учётом малости перепада давления по сравнению с атмосферным давлением  $P_0$  из уравнения состояния идеального газа получим  $\rho_0 T_0 = \rho_g T_g$ . В случае равномерного распределения плотности по высоте для давления газа внутри и снаружи помещения будем иметь линейные распределения давления по высоте:

$$P_{in}(z) = P_0 - \rho_g g z, \quad P_{out}(z) = P_0 - \rho_0 g z. \quad (53)$$

Перепад давления по разные стороны проема составит:

$$\Delta P(z) = P_{in}(z) - P_{out}(z) = (\rho_0 - \rho_g) g z. \quad (54)$$

Отметим, что начало координат (точка  $z = 0$ ) выбрано на так называемой *нейтральной плоскости*, т.е. там, где перепад давления по разные стороны проема равен нулю. Эта плоскость разделяет входящий поток холодного воздуха и выходящий поток горячего газа.

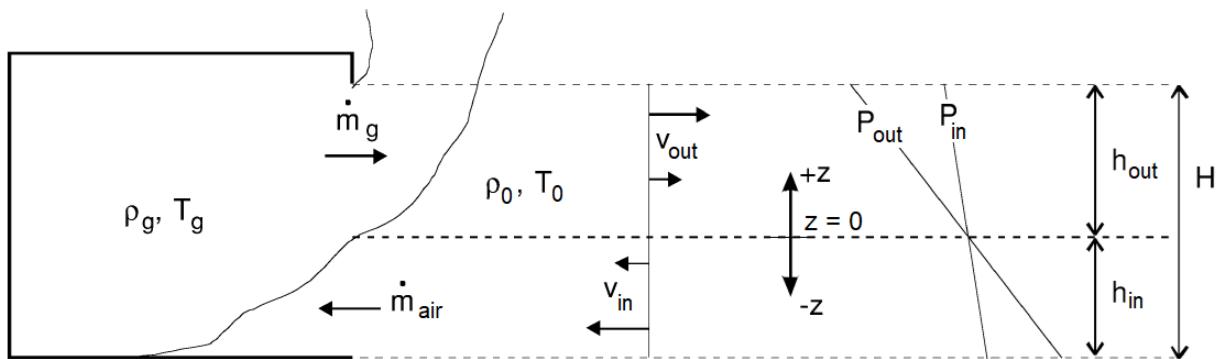


Рис. 26. Однозонная модель (равномерное распределение температуры и плотности газа по высоте помещения)

Для приближённого расчёта скорости газовых потоков в проемах используют уравнение Бернуlli:

---

<sup>12</sup> В отечественной литературе (см., например, [8, 12] и др.) такую модель называют интегральной.

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h \Big|_{(\bullet 1)} = P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h \Big|_{(\bullet 2)}, \quad (55)$$

где точки  $\bullet 1$  и  $\bullet 2$  располагаются по разные стороны от проема. Применение этого уравнения для горизонтальных линий тока, расположенных во входящем и выходящем потоках, с учётом (53) приводит к следующим равенствам

$$v_{in} = \sqrt{\frac{2(\rho_g - \rho_0)gz}{\rho_0}}, \quad v_{out} = \sqrt{\frac{2(\rho_0 - \rho_g)gz}{\rho_g}}. \quad (56)$$

Интегрируя по высоте участков проёма снизу и сверху от нейтральной линии, получим выражения для массовых расходов входящего воздуха и выходящего газа:

$$\dot{m}_{air} = C_d W \frac{2}{3} h_{in}^{3/2} \sqrt{2\rho_0 (\rho_0 - \rho_g) g}, \quad (57)$$

$$\dot{m}_g = C_d W \frac{2}{3} h_{out}^{3/2} \sqrt{2\rho_g (\rho_0 - \rho_g) g}, \quad (58)$$

где  $W$  – ширина проёма,  $h_{in}$  и  $h_{out} = H - h_{in}$  – высоты участков проёма над и под нейтральной плоскостью,  $C_d \approx 0.7$  – коэффициент, который учитывает приближённый характер сделанных допущений.

В формулах (58) и (57) необходимо определить значения  $h_{in}$  и  $h_{out}$ . В общем случае для этого нужно решить уравнение балансы масса газа в помещении:

$$\frac{dm_{in}}{dt} = \dot{m}_{air}(h_{in}) - \dot{m}_g(h_{out}) + \dot{m}_{fuel} \quad (59)$$

совместно с уравнением баланса тепла, из которого следует зависимость температуры газа  $T_g$  от времени. При этом оказывается, что положение нейтральной плоскости с течением времени изменяется. На начальной стадии нейтральная плоскость расположена ниже уровня пола, входящий поток отсутствует, а всё сечение проема занято выходящим потоком. В этом случае говорят, что проем работает только на выход. По мере установления стационарного режима нейтральная плоскость стабилизируется между нижней и верхней кромкой проема, и проем работает как на выход, так и на вход. Пример нестационарного анализа, выполненного в рамках однозонной модели, содержится в работе [13] (Снегирев А.Ю., Танклевский Л.Т., 1998).

Рассмотрим стационарное состояние, в котором  $dm_{in}/dt \approx 0$ . Кроме того, будем пренебрегать вкладом массы горючего в баланс массы газа в помещении:  $\dot{m}_{fuel} \ll \dot{m}_{air}(h_{in}), \dot{m}_g(h_{out})$ . В этом случае из приближённого равенства  $\dot{m}_{air}(h_{in}) \approx \dot{m}_g(h_{out})$  с учётом (58) и (57) следует, что  $h_{out}/h_{in} = (\rho_0/\rho_g)^{1/3} = (T_g/T_0)^{1/3}$ . Полагая, что  $T_g/T_0 \approx 2-4$ , получим для высоты нейтральной плоскости над нижней кромкой проема:  $h_{in}/H \approx 0.44-0.39$ .

Приведённый анализ показывает, что в стационарном режиме  $h_{in} \approx H/(1+(T_g/T_0)^{1/3}) \sim H$ . Это значит, что массовый поток входящего воздуха (57) пропорционален величине  $WH^{3/2} = (WH)H^{1/2} = A_O H^{1/2}$ , которую называют *вентиляционным параметром* ( $A_O$  – площадь проема).

Роль вентиляционного параметра особенно велика в условиях полностью развитого пожара, в котором мощность тепловыделения определяется количеством воздуха, поступающим в помещение в единицу времени (режим ПРВ). В этом случае весь содержащийся во входящем воздухе кислород полностью расходуется при горении, а мощность тепловыделения составляет  $\dot{Q} = \Delta h_{c,O_2} Y_{O_2,air} G_{in}$ . При  $C_d \approx 0.7$ ,  $T_g/T_0 \approx 3$ , получим приближённое равенство

$$\dot{m}_{air} \approx 0.5 A_O H^{1/2}, \text{ кг/с,} \quad (60)$$

которое было впервые экспериментально подтверждено в опытах К. Кавагои в 1950х годах [31]. Учитывая, что  $\Delta h_{c,O_2} = 13 \text{ МДж/кг}$ ,  $Y_{O_2,air} = 0.233$ , будем иметь

$$\dot{Q} \approx 1500 A_O H^{1/2}, \text{ кВт.} \quad (61)$$

Подчеркнём, что равенство (61) получено для режима пожара, регулируемого вентиляцией.

Приведенный анализ опирается на предположение о равномерном распределении температуры и плотности газа по высоте помещения. Более точный результат можно получить, если учесть стратификацию температуры и плотности по высоте и рассмотреть *двухзонную* модель, в которой одна из зон соответствует нижнему слою холодного воздуха, а вторая – горячему припотолочному слою (рис. 27).

В двухзонной модели появляется дополнительный параметр – расстояние от нижней кромки проема до границы зон ( $h_*$ ). В этом случае равенства (58) и

(57) сохраняются, а для расчёта  $h_{in}$  выполняется неявное уравнение ([30], формула (5.36)):

$$(H - h_{in})^{3/2} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_g}} (h_{in} - h_*)^{1/2} \left( h_{in} + \frac{1}{2} h_* \right). \quad (62)$$

Численное решение этого уравнения требует итераций, для которых в качестве начального приближения можно принять  $h_{in} = 0.5 H$ . В приближённых расчётах положение нижней границы припотолочного слоя ( $h_*$ ) считают известным.

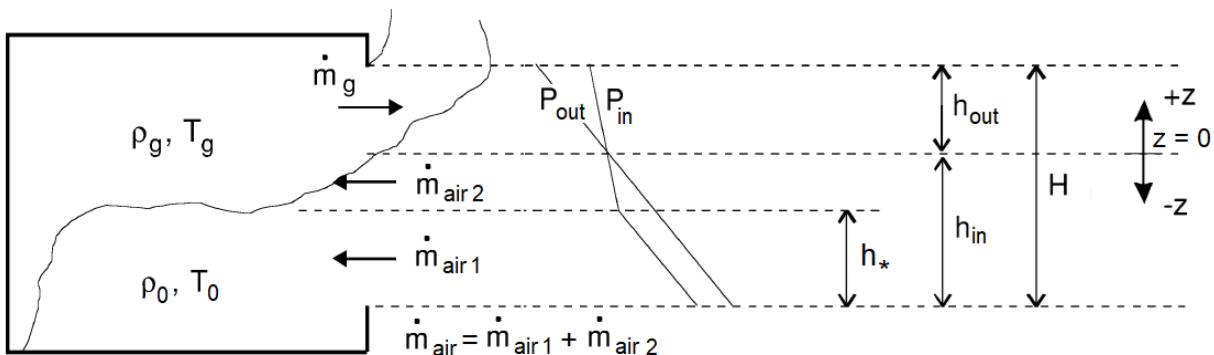


Рис. 27. Двухзонная модель (учёт стратификации температуры и плотности газа по высоте помещения)

С учетом уравнения состояния газа  $\rho_g T_g = \rho_0 T_0$  равенство (57) может быть записано в виде:

$$\dot{m}_g = C_d W \frac{2}{3} (H - h_{in})^{3/2} \rho_0 \sqrt{2 \frac{T_0}{T_g} \left( 1 - \frac{T_0}{T_g} \right)} g. \quad (63)$$

Зависимость массового расхода уходящего газа от температуры припотолочного слоя, вычисленная по формуле для нескольких значений  $h_{in}/H$ , показана на рис. 28.

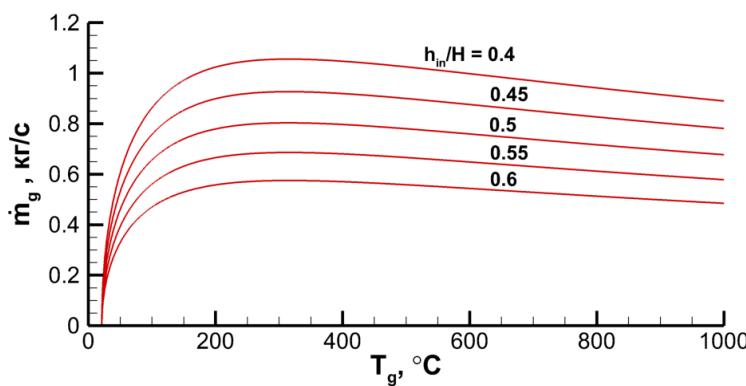


Рис. 28. Зависимость массового расхода уходящего газа от температуры припотолочного слоя (63) ( $H = 1.83$  м,  $W = 0.74$  м,  $T_0 = 294$  К,  $\rho_0 = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_d = 0.7$ )

Зависимость  $\dot{m}_g(T_g)$  немонотонна, поскольку увеличение температуры газа приводит к увеличению скорости потока и уменьшению плотности.

#### 4.2.2. Температура горячего слоя

При наличии газообмена через вертикальные проёмы формируется горячий слой продуктов сгорания в припотолочной области (рис. 29). Знание температуры припотолочного слоя важно для оценки его опасности для человека, а также для прогнозирования теплового воздействия на конструкции и горючие материалы. В данном разделе излагаются методы приближённого оценивания температуры припотолочного слоя, разработанные в [23, 25, 30, 35, 41, 48]. Рассматриваются сценарии пожара, в которых горение протекает над локальным очагом при избытке окислителя (режим ПРН).

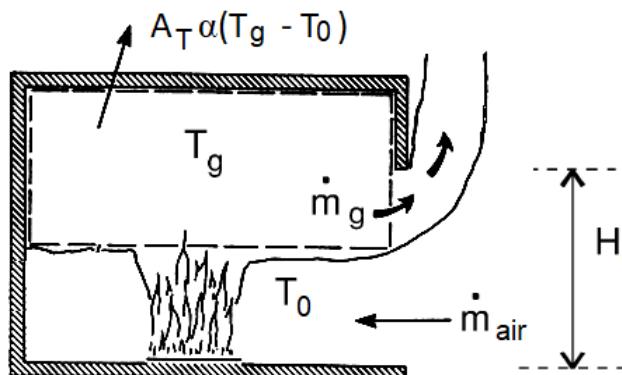


Рис. 29. Припотолочный слой продуктов сгорания в помещении с проемом

В основе всех методов лежит баланс тепла в горячем слое:

$$\underbrace{\dot{Q}}_{\substack{\text{Тепловыделение} \\ \text{в очаге пожара}}} = \underbrace{\dot{m}_g c_p (T_g - T_0)}_{\substack{\text{Перенос энтальпии} \\ \text{газовым потоком}}} + \underbrace{A_T \alpha (T_g - T_0)}_{\substack{\text{Теплоотвод в стены} \\ \text{и перекрытия}}}, \quad (64)$$

где  $\dot{m}_g = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air}$  – массовый поток уходящих продуктов ( $\text{кг}/\text{с}$ ),  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи ( $\text{кВт}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ), определяемый как отношение теплового потока из внутреннего объема помещения в окружающую среду к соответствующей разности температур,  $A_T$  – полная площадь поверхности стен и перекрытий, на которой имеет место теплообмен ( $\text{м}^2$ ).

Будем полагать, что мощность тепловыделения  $\dot{Q}$  не изменяется с течением времени, либо изменяется настолько медленно, что в каждый момент времени выполняется стационарный тепловой баланс (64). Существующие методы

оценки температуры припотолочного слоя отличаются формой записи равенства (64) и способом его аппроксимации, а также способами расчёта коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (который определяется термическим сопротивлением стен и перекрытий) и массового потока горячего газа  $\dot{m}_g$  (который определяется естественно-конвективным или вынужденным режимом газообмена).

Метод MQH, предложенный в работе [35] (R. McCaffrey, J. Quintiere, M. Hakleroad, 1981) использует уравнение баланса тепла (64), записанное в виде:

$$\frac{\Delta T_g}{T_0} = \frac{\dot{Q}/\dot{m}_g c_p T_0}{1 + \alpha A_T / \dot{m}_g c_p}, \quad (65)$$

где  $\Delta T_g = T_g - T_0$ . Равенство (65) показывает, что относительный прирост температуры  $\Delta T_g/T_0$  зависит от двух безразмерных критериев:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_0} \sim \frac{\text{тепловыделение}}{\text{поток энталпии газа}}, \quad (66)$$

$$\frac{\alpha A_T}{\dot{m}_g c_p} \sim \frac{\text{теплопотери}}{\text{поток энталпии газа}}. \quad (67)$$

Если газообмен через вертикальный проем вызван естественной конвекцией, то в соответствии с равенством (57) массовый поток газа, выходящего из помещения через проём составит  $\dot{m}_g = (2/3)C_d Wh_{out}^{3/2} \sqrt{2\rho_0(\rho_0 - \rho_g)g} \sim \sqrt{g\rho_0 A_o H^{1/2}}$ . В связи с этим зависимость  $\Delta T_g/T_0$  аппроксимируется степенной функцией двух аргументов, соответствующих (66) и (67):

$$\frac{\Delta T_g}{T_0} = f \left( \underbrace{\frac{\dot{Q}}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} A_o H^{1/2}}}_{X_1}, \underbrace{\frac{\alpha A_T}{c_p \rho_0 \sqrt{g} A_o H^{1/2}}}_{X_2} \right) = C X_1^N X_2^M, \quad (68)$$

в которой эмпирические константы  $C$ ,  $N$  и  $M$  определяются так, чтобы получить наилучшее соответствие с результатами измерений.

В методе MQH рассматривается горение в помещении, стены и перекрытия которого выполнены из теплоизолирующего материала с большим термическим сопротивлением (по сравнению с термическим сопротивлением пограничных слоёв в газе по обе стороны от слоя твердого материала). В этом случае эффективный коэффициент теплоотдачи оценивается одним из двух выраже-

ний, соответствующих теплопередаче в термически толстом и термически тонком слое материала<sup>13</sup>:

$$\alpha = \begin{cases} \sqrt{\lambda_w c_w \rho_w / t} , & t < \delta^2 / (4a_w) - \text{термически толстый слой} \\ \lambda_w / \delta , & t \geq \delta^2 / (4a_w) - \text{термически тонкий слой} \end{cases}. \quad (69)$$

Если разные части помещения отделаны разными материалами, то вычисляется среднее значение коэффициента теплоотдачи с учетом соответствующих площадей. Если стены и перекрытия состоят из нескольких слоев, то для суммарного коэффициента теплоотдачи полагают  $\alpha_{\Sigma} = (\sum \alpha_i^{-1})^{-1}$ , где  $i$  – номер слоя.

Обработка экспериментальных данных показала, что они аппроксимируются следующим равенством:

$$\frac{\Delta T_g}{T_0} = 1.63 \left( \frac{\dot{Q}}{c_p \rho_0 T_0 \sqrt{g} A_o H^{1/2}} \right)^{2/3} \left( \frac{\alpha A_T}{c_p \rho_0 \sqrt{g} A_o H^{1/2}} \right)^{-1/3}, \quad (70)$$

в котором  $\dot{Q}$  измеряется в кВт,  $\alpha$  – в кВт(м<sup>2</sup>·К),  $H$  – в м,  $A_o$  и  $A_T$  – в м<sup>2</sup>. Отметим, что степень 2/3 в зависимости  $\Delta T_g \sim \dot{Q}^{2/3}$  согласуется с соотношениями (48) для очага пожара в неограниченном пространстве. Подстановка  $c_p = 1.05$  кДж/(кг·К),  $\rho_0 = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_0 = 293$  К и  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> приводит к следующему выражению для прироста температуры в припотолочном слое [35]:

$$\Delta T_g = 6.85 \left( \frac{\dot{Q}^2}{A_o H^{1/2} \alpha A_T} \right)^{1/3}. \quad (71)$$

Формулу (71) можно использовать для приближённой оценки мощности тепловыделения, достаточной для общей вспышки. Вероятность общей вспышки становится достаточно большой, если температура горячего слоя возрастает на величину  $\Delta T_g = 500$  °С. Подстановка этого значения в (71) дает

$$\dot{Q}_{cr} = 610 (\alpha A_T A_o H^{1/2}), \text{ кВт}. \quad (72)$$

Равенство (72) показывает, что критическая мощность тепловыделения зависит от интенсивности теплопотерь (через коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ ) и,

---

<sup>13</sup> Отметим, что при  $t = \delta^2 / (4a_w)$  вычисляемая по формуле (69) зависимость коэффициента теплоотдачи от времени терпит разрыв.

следовательно, от материала и толщины стен и перекрытий (см. равенства (69) и (76)) и от размеров проема.

Экспериментальные данные, использованные при выводе равенства (70) получены в следующих условиях: температура припотолочного слоя не превышает 600 °C; установившийся режим газообмена через проем; мощность тепловыделения постоянна; очаг пожара расположен вдали от стен (в окрестности центра помещения); высота помещения составляет от 0.3 до 2.7 м, площадь горизонтального сечения от 0.14 до 12 м<sup>2</sup>; теплопотери определяются термическим сопротивлением материала стен и перекрытий. Можно заключить, что метод MQH применим для естественной вентиляции и теплоизолирующих материалов стен.

Метод расчёта температуры припотолочного слоя при *вынужденной* вентиляции, т.е. если задан расход воздуха, который также определяет расход продуктов  $\dot{m}_g$  через проём, был предложен в работе [25] (K.L. Foote, P.J. Pagni, N.J. Alvares, 1986). При этом, как и в методе MQH, использована аппроксимация (68). Коэффициенты  $C$ ,  $N$  и  $M$  определены в результаты обработки результатов измерений, полученных в следующих условиях: помещение имеет размеры 6×4 м, высота 4.5 м; подача воздуха выполняется через прямоугольные отверстия шириной 0.5 м и высотой 0.12 м с центром на высоте 0.1 м над уровнем поля; расход воздуха задается вентилятором и поддерживается на постоянном уровне (от 110 до 325 г/с); горячий газ выходит из припотолочного слоя через прямоугольные отверстия 0.65×0.65 м, расположенные на высоте 3.6 м над уровнем пола; очаг пожара представляет собой пористую горелку диаметром 0.56 м; горючий газ (метан) подаётся в горелку с постоянным расходом, соответствующим тепловой мощности от 150 до 490 кВт; стены и потолок выполнены из жаропрочного алюмосиликатного материала толщиной 10 см; температура горячего слоя составляет от 100 до 300 °C. В результате обработки экспериментальных данных получено:

$$\frac{\Delta T_g}{T_0} = 0.63 \left( \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p T_0} \right)^{0.72} \left( \frac{\alpha A_T}{\dot{m}_g c_p} \right)^{-0.36}. \quad (73)$$

Близость соотношений (70) и (73) указывает на возможность получения единого выражения, пригодного как для естественно-конвективной, так и для

вынужденной вентиляции. В работе [25] показано, что после замены коэффициента 0.63 на 0.7 равенство (73) описывает экспериментальные данные для обоих сценариев с точностью 10%.

Поскольку характерный температурный интервал определяется отношением  $\dot{Q}/(\dot{m}_g c_p)$ , вместо отношения  $\Delta T_g/T_0$  можно использовать величину  $\dot{m}_g c_p \Delta T_g / \dot{Q}$ . В этом случае баланс энергии (64) в припотолочном слое записывается в виде равенства

$$\frac{\dot{m}_g c_p \Delta T_g}{\dot{Q}} = \frac{1}{1 + \alpha A_T / (\dot{m}_g c_p)}, \quad (74)$$

в котором вместо двух безразмерных аргументов  $X_1$  и  $X_2$ , заданных равенствами (66) и (67) и использованных в приведённых выше корреляциях, остаётся единственный аргумент  $\alpha A_T / \dot{m}_g c_p$ . В результате обработки результатов измерений в работе [25] предложена следующая зависимость

$$\frac{\dot{m}_g c_p \Delta T_g}{\dot{Q}} = \exp\left(-0.53\left(\frac{\alpha A_T}{\dot{m}_g c_p}\right)^{0.43}\right), \quad (75)$$

которая обобщает результаты измерений, выполненных как при естественно-конвективном газообмене через вертикальный прем, так и при вынужденной вентиляции. Преимущество данной формулы заключается в том, что (в отличие от (70) и (73)) она правильно описывает предельные случаи идеальной теплоизоляции  $\alpha A_T / (\dot{m}_g c_p) \rightarrow 0$  и очень больших теплопотерь  $\alpha A_T / (\dot{m}_g c_p) \rightarrow \infty$ , в которых  $\Delta T_g \rightarrow \dot{Q}/(\dot{m}_g c_p)$  и  $\Delta T_g \rightarrow 0$ .

Равенство (75) получено с помощью соотношений (69) для коэффициента теплоотдачи. Позднее в работе [23] (S. Deal, C. Beyler, 1990) было показано, что экспериментальные зависимости  $\dot{m}_g c_p \Delta T_g / \dot{Q}$  от  $\alpha A_T / \dot{m}_g c_p$  с хорошей точностью описываются непосредственно равенством (74), т.е. без использования степенной или экспоненциальной аппроксимации. В соответствии с [23], это становится возможным, если для эффективного коэффициента теплоотдачи использовать следующее выражение:

$$\alpha = C_\alpha \max\left(\sqrt{\frac{\lambda_w c_w \rho_w}{t}}, \frac{\lambda_w}{\delta}\right), \quad (76)$$

где значение  $C_\alpha = 0.4$  выбрано так, чтобы минимизировать рассогласование результатов измерений и расчёта по формуле (75). Равенство (76) описывает переход к термически тонкому пределу при  $t = \delta^2/a_w$  и, в отличие от (69), не содержит разрыва при переходе. Отметим, что формула (76) согласуется с формулой (69) в пределах термически толстого и термически тонкого слоя при  $C_\alpha = 1$ .

Перечисленные выше методы предназначены для таких сценариев пожара, в которых интенсивность теплопотерь определяется большим термическим сопротивлением материала стен и перекрытий. В противоположном случае малого термического сопротивления стен (хорошо проводящий материал, малая толщина) интенсивность теплопотерь из припотолочного слоя определяется теплопередачей в газе, которая характеризуется коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_g$  (внутри помещения) и  $\alpha_0$  (снаружи).

Рассмотрим предельный случай, в котором перепад температуры в стенке мал, и температуру стенки можно принять равной среднему значению  $T_w$ . Тогда тепловой баланс в стенке имеет вид

$$c_w \rho_w \delta_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_g (T_g - T_w) - \alpha_0 (T_w - T_0), \quad (77)$$

Решение уравнения с начальным условием  $T_w(t=0) = T_0$  дает следующее выражение для температуры стенки:

$$T_w - T_0 = (T_g - T_0) \frac{\alpha_g}{\alpha_g + \alpha_0} \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_{rel}} \right) \right), \quad \tau_{rel} = \frac{c_w \rho_w \delta_w}{\alpha_g + \alpha_0}. \quad (78)$$

При длительности нагрева, существенно превышающей время тепловой релаксации  $\tau_{rel}$ , устанавливается квазистационарное значение температуры стенки, равное  $T_w = (\alpha_g T_g + \alpha_0 T_0) / (\alpha_g + \alpha_0)$ .

Тепловой поток из горячего газа в стенку составляет

$$q''_w = \alpha_g (T_g - T_w) = \alpha (T_g - T_0), \quad (79)$$

где эффективный коэффициент теплоотдачи учитывает теплопередачу по обе стороны от стенки:

$$\alpha = \alpha_g - \frac{\alpha_g^2}{\alpha_g + \alpha_0} \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_{rel}} \right) \right) \rightarrow \begin{cases} \alpha_g, & t \ll \tau_{rel} \\ \frac{\alpha_g \alpha_0}{\alpha_g + \alpha_0}, & t \gg \tau_{rel} \end{cases}. \quad (80)$$

Равенство (80) применяется для расчета температуры горячего слоя с помощью теплового баланса (64). В работе [41] удовлетворительное согласие с результатами измерений получено при  $\alpha_g \approx 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и  $\alpha_0 \approx 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Таблица 17

**Методы расчёта температуры припотолочного слоя**

Условия применимости	Температура припотолочного слоя $\Delta T_g = T_g - T_0$	Эффективный коэффициент теплоотдачи, $\alpha = q''_W / (T_g - T_0)$	Время релаксации поля температуры в стенке, $\tau_{rel}$	Источник
Естественная конвекция, стенка с большим термическим сопротивлением	$6.85 \left( \frac{\dot{Q}^2}{A_0 H^{1/2} \alpha A_T} \right)^{1/3}$	$\begin{cases} \sqrt{\frac{\lambda_w c_w \rho_w}{t}}, & t \leq \tau_{rel} \\ \frac{\lambda_w}{\delta}, & t > \tau_{rel} \end{cases}$	$\left( \frac{\delta}{2} \right)^2 \frac{c_w \rho_w}{\lambda_w}$	[35] (R. McCaffrey, J. Quintiere, M. Hakleroad, 1981)
Вынужденная конвекция, стенка с большим термическим сопротивлением	$0.63 T_0 \left( \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_P T_0} \right)^{0.72} \times \left( \frac{\alpha A_T}{\dot{m}_g c_P} \right)^{-0.36}$			[25] (K. Foote, P. Pagni, N. Alvares, 1986)
Вынужденная конвекция, стенка с большим термическим сопротивлением		$0.4 \max \left( \sqrt{\frac{\lambda_w c_w \rho_w}{t}}, \frac{\lambda_w}{\delta} \right)$	Не требуется	[23] (S. Deal, C. Beyler, 1990)
Вынужденная конвекция, стенка с малым термическим сопротивлением	$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_P + \alpha A_T}$	$\alpha_g - \frac{\alpha_g^2}{\alpha_g + \alpha_0} \times \exp \left( -\frac{t}{\tau_{rel}} \right)$	$\frac{c_w \rho_w \delta}{\alpha_g + \alpha_0}$	[41] (M. Peatross, C. Beyler, 1994)

Перечисленные методы расчёта температуры припотолочного слоя обобщены в табл. 17. Напомним, что эти методы предназначены для режима пожара, регулируемого нагрузкой, т.е. для горения в условиях избыточной вентиляции.

Если вовлечение холодного воздуха в образующийся над очагом пожара тепловой факел ограничено из-за близости стен, то температура припотолочного слоя оказывается более высокой, чем при расположении очага вдали от стен. Это учитывается умножением правой части равенства (71) на коэффициент, равный 1.3 при расположении очага вблизи стены и 1.7 при расположении очага в углу помещения.

Поскольку данные о температуре и высоте припотолочного слоя необходимы при проектировании систем обнаружения пожара, а также систем вентиляции и дымоудаления, эти величины определяются в FDS в ходе численного расчёта. Запросить вывод температуры и высоты припотолочного слоя, а также температуру холодного слоя воздуха в помещении можно с помощью группы &DEVC и параметров 'LAYER HEIGHT', 'UPPER TEMPERATURE' и 'LOWER TEMPERATURE' [55].

## 4.3. Применение FDS

### 4.3.1. Расчетная область и расчетная сетка

При моделировании газообмена через проем плоскость проема следует располагать *внутри* расчётной области. Если за пределами помещения рассматривается открытое пространство, то внешние границы расчётной области необходимо располагать на достаточном удалении от открытых проемов, чтобы выходящий поток и, возможно, пламя не взаимодействовали с границами. Пример расчётной области для рассматриваемого задания показан на рис. 30.

В литературе можно найти следующие рекомендации.

- Размер ячейки сетки в зоне пламени должен быть намного меньше характерной длины, которая определяется равенством (42):  $D^*/\Delta x > 10$  [52].
- Расстояние между проемом и гранью расчетной области должно составлять не менее половины гидравлического диаметра  $D$  наибольшего проема [27]. Для прямоугольного проема гидравлический диаметр связан с площадью отверстия  $A_o$  и его периметром  $\Pi$  равенством  $D = 4A_o/\Pi$ .

- Для сценария, в котором пожар сопровождается выбросом пламени через проем, в [50] предложен критерий достаточно сеточного разрешения

$$\left( A_o \sqrt{H} \right)^{2/5} / \Delta x > 10 \text{ и } D / \Delta x > 10, \quad (81)$$

где  $A_o \sqrt{H}$  – параметр вентиляции ( $A_o$  и  $H$  – площадь проема),  $D$  – гидравлический диаметр проема.

Данные рекомендации не являются универсальными. Подбор размеров расчетной области, оценка достаточности сеточного разрешения и исследование сеточной зависимости необходимо выполнять индивидуально для каждого случая.

#### 4.3.2. Подготовка fds-файла

Создадим файл Steckler.fds, полный текст которого приведен ниже:

```
&HEAD CHID='Steckler'/
&TIME T_END=1500, TIME_SHRINK_FACTOR=20 /

&DUMP DT_RESTART=300.0/
&DUMP NFRAMES=100, DT_DEVIC=10., DT_HRR=10., SIG FIGS=4,
SIG FIGS_EXP=2/

&MESH ID='MESH', IJK=67,27,79, XB=-1.4,1.4,-1.6,-0.5,0.0,3.3/
&MESH ID='MESH', IJK=67,27,79, XB=-1.4,1.4,-0.5,0.6,0.0,3.3/
&MESH ID='MESH', IJK=67,27,79, XB=-1.4,1.4,0.6,1.7,0.0,3.3/
&MESH ID='MESH', IJK=67,27,79, XB=-1.4,1.4,1.7,2.8,0.0,3.3/

&MISC TMPA=29. /

&REAC FUEL='METHANE', CO_YIELD=0.005, SOOT_YIELD=0.002/

&MATL ID= 'INSULATION', DENSITY= 200, CONDUCTIVITY = 0.1,
SPECIFIC_HEAT = 1 /

&SURF ID='FIBER BOARD', DEFAULT=.TRUE., MATL_ID='INSULATION',
THICKNESS=0.1, COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3 /
&SURF ID='Burner', COLOR='RED', HRRPUA=890, TMP_FRONT=100/

&VENT ID='Vent01', SURF_ID='OPEN', XB=-1.4,-1.4,-1.6,2.8,2.3,3.3/
&VENT ID='Vent02', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.4,-1.6,2.8,2.3,3.3/
&VENT ID='Vent03', SURF_ID='OPEN', XB=-1.4,1.4,2.8,2.8,2.3,3.3/
&VENT ID='Vent04', SURF_ID='OPEN', XB=-1.4,1.4,-1.6,-1.6,0.0,3.3/
&VENT ID='Vent05', SURF_ID='OPEN', XB=-1.4,1.4,-1.6,2.8,3.3,3.3/
&VENT ID='Vent06', SURF_ID='OPEN', XB=-1.4,-1.4,-1.6,-0.1,0.0,2.3/
&VENT ID='Vent07', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.4,-1.6,-0.1,0.0,2.3/
```

```

&VENT ID='Vent', SURF_ID='Burner', XB=-
0.133,0.133,1.25,1.516,0.0,0.0/

&OBST ID='Right_Wall', XB=-1.4,1.4,0.0,-0.1,0.0,2.3,
    SURF_ID='FIBER BOARD', COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3/
&OBST ID='Ceiling', XB=-1.4,1.4,0,2.8,2.2,2.3, SURF_ID='FIBER
    BOARD', COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3/

&HOLE ID='Hole', XB=-0.37,0.37,-0.1,0.1,0,1.82/

&DEVC ID='T_door', XB= 0.00,0.00,0.00,0.00,0.0,1.82, POINTS=15,
    QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS_START=37.,
    STATISTICS_END=75./
&DEVC ID='Vel_door', XB= 0.00,0.00,0.00,0.00,0.0,1.82, POINTS=15,
    QUANTITY='VELOCITY' STATISTICS_START=37., STATISTICS_END=75./
&DEVC ID='U_door', XB= 0.00,0.00,0.00,0.00,0.0,1.82, POINTS=15,
    QUANTITY='U-VELOCITY', STATISTICS_START=37.,
    STATISTICS_END=75./
&DEVC ID='V_door', XB= 0.00,0.00,0.00,0.00,0.0,1.82, POINTS=15,
    QUANTITY='V-VELOCITY', STATISTICS_START=37.,
    STATISTICS_END=75./
&DEVC ID='W_door', XB= 0.00,0.00,0.00,0.00,0.0,1.82, POINTS=15,
    QUANTITY='W-VELOCITY', STATISTICS_START=37.,
    STATISTICS_END=75./

&DEVC XB=-0.37,0.37,0,0,0,1.82, QUANTITY = 'MASS FLOW +' ID
    ='DM_in'/ Doorway mass inflow
&DEVC XB=-0.37,0.37,0,0,0,1.82, QUANTITY = 'MASS FLOW -' ID
    ='DM_out'/ Doorway mass outflow

&DEVC ID='HGL Temp', XB=1,1,0.4,0.4,0,1.82, QUANTITY='UPPER
    TEMPERATURE'/
&DEVC ID='CGL Temp', XB=1,1,0.4,0.4,0,1.82, QUANTITY='LOWER
    TEMPERATURE'/
&DEVC ID='HGL Height', XB=1,1,0.4,0.4,0,1.82, QUANTITY='LAYER
    HEIGHT'/

&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='HRRPUV'/
&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='METHANE'/

&SLCF PBY=1.4, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=1.4, QUANTITY='HRRPUV'/
&SLCF PBY=1.4, QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='METHANE'/

&TAIL /

```

Рассмотрим структуру этого файла подробно. В группе &TIME помимо общего времени задан также параметр TIME\_SHRINK\_FACTOR, который позволяет ускорить расчет для стационарных процессов. Этот параметр уменьшает

теплоемкость твердых материалов (в данном случае в 20 раз), что позволяет увеличить шаг по времени и сократить количество шагов по времени<sup>14</sup>:

```
&TIME    T_END=1500,  
         TIME_SHRINK_FACTOR=20 /  
  
&DUMP    DT_RESTART=300.0 /
```

**Совет:** Не используйте параметр TIME\_SHRINK\_FACTOR для расчета нестационарных процессов. Подробнее об этом параметре см. в [55].

В группе &DUMP задана группа параметров, управляющая тем, насколько часто выполняется запись результатов.

```
&DUMP    NFRAMES=100,  
         DT_DEV_C=10, DT_HRR=10,  
         SIG_FIGS=4, SIG_FIGS_EXP=2 /
```

**Замечание:** Чем реже выполняется запись результатов в файлы, тем быстрее выполняется расчет.

Группа &MESH задает размеры расчётной области и число узлов сетки:

```
&MESH    ID='MESH',  
         IJK=50,50,50,  
         XB=-1.4,1.4,-1.6,2.8,0.0,3.3 /
```

Параметр TMPC в группе &MISC задает температуру окружающей среды в градусах Цельсия:

```
&MISC    TMPC= 25. /
```

В группе &REAC указан тип газообразного горючего, выход монооксида углерода и сажи (CO\_YIELD, SOOT\_YIELD), выраженный в кг/кг горючего (подробнее см. в разделе 5.2.2):

---

<sup>14</sup> Изменение теплоемкости влияет только на переходный период. Стационарная температура не зависит от теплоёмкости.

```
&REAC    FUEL='METHANE',
          CO_YIELD=0.005,
          SOOT_YIELD=0.002 /
```

В группе &MATL создан новый материал под названием 'INSULATION':

```
&MATL    ID= 'INSULATION',
          DENSITY= 200,
          CONDUCTIVITY = 0.1,
          SPECIFIC_HEAT = 1 /
```

Этот материал (MATL\_ID) используется при создании нового типа граничного условия (ID = 'FIBER BOARD'). Этот тип граничного условия будет использоваться по умолчанию (DEFAULT = .TRUE.), и выделяться полупрозрачным желтым цветом (COLOR, TRANSPARENCY). Полупрозрачность задана для более удобной визуализации процессов внутри помещения в Smokeview. Толщина слоя (THICKNESS) задана равной 0.1 м:

```
&SURF    ID='FIBER BOARD',
          DEFAULT=.TRUE.,
          MATL_ID='INSULATION',
          THICKNESS=0.1,
          COLOR='YELLOW',
          TRANSPARENCY=0.3 /
```

Следующий тип граничного условия описывает газовую горелку с постоянным расходом горючего и заданной температурой поверхности:

```
&SURF    ID='Burner',
          COLOR='RED',
          HRRPUA=250,
          TMP_FRONT=500 /
```

Далее в группах &VENT указываются граничные условия на гранях расчетной области. Поскольку граничное условие по умолчанию соответствует теплопроводящим стенкам, то остается указать только те участки границ, которые открыты для течения газа. В соответствии с рекомендациями раздела 4.3.1, границы расчетной области находятся на достаточном расстоянии от проема:

```

&VENT    ID='Vent01',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=-1.4,-1.4,-1.6,2.8,2.3,3.3/

&VENT    ID='Vent02',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=1.4,1.4,-1.6,2.8,2.3,3.3/

&VENT    ID='Vent03',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=-1.4,1.4,2.8,2.8,2.3,3.3/

&VENT    ID='Vent04',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=-1.4,1.4,-1.6,-1.6,0.0,3.3/

&VENT    ID='Vent05',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=-1.4,1.4,-1.6,2.8,3.3,3.3/

&VENT    ID='Vent06',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=-1.4,-1.4,-1.6,-0.1,0.0,2.3/

&VENT    ID='Vent07',
          SURF_ID='OPEN',
          XB=1.4,1.4,-1.6,-0.1,0.0,2.3/

```

Расчётная область и граничные условия показаны на рис. 30. В центре помещения задана область, для которой использовано граничное условие 'Burner':

```

&VENT    ID='Vent',
          SURF_ID='Burner',
          XB=-0.14,0.14,1.25,1.55,0.0,0.0/

```

Потолок и правая стена, в центре которой расположен проем, заданы в виде объемных фигур (OBST), а не плоскостей (VENT):

```

&OBST   ID='Right_Wall',
          XB=-1.4,1.4,0.0,-0.1,0.0,2.3,

```

```

SURF_ID='FIBER BOARD',
COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3/

&OBST    ID='Ceiling',
XB=-1.4,1.4,0,2.8,2.2,2.3,
SURF_ID='FIBER BOARD',
COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3/

```

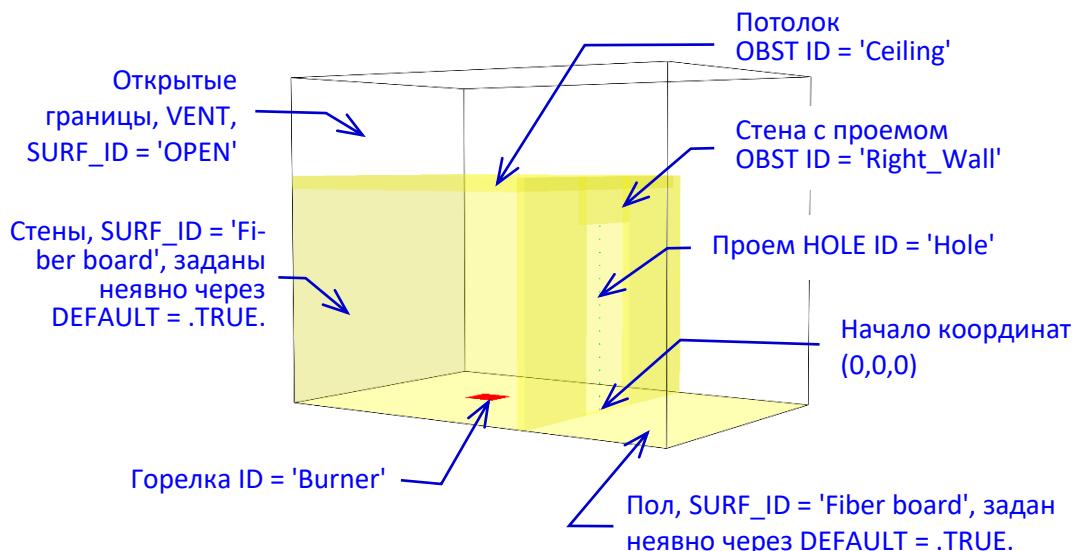


Рис. 30. Расчетная область, заданная в Steckler.fds

Чтобы создать проем в правой стене использована группа &HOLE:

```

&HOLE    ID='Hole',
XB=-0.4,0.4,-0.1,0.1,0,1.82/

```

**Совет:** Толщина стен, заданных с использованием OBST должна быть не меньше толщины одной ячейки. В противном случае эти объекты будут отображаться как плоские, а не объемные фигуры.

Толщина проема должна быть немного больше толщины стен и больше толщины одной ячейки. Иначе проем может оказаться несквозным.

Результат расчета будут неточны, если количество ячеек сетки в сечении проема слишком мало. Может понадобиться сгущение сетки вблизи узкого проема.

С помощью параметра POINTS и групп &DEVC на вертикальной оси проема установлены 15 точек мониторинга температуры и скорости (модуля и трех компонентов):

```

&DEVC    ID='T_door',
             XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.82,
             POINTS=15,
             QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC    ID='Vel_door',
             XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.82,
             POINTS=15,
             QUANTITY='VELOCITY' /

&DEVC    ID='U_door',
             XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.82,
             POINTS=15,
             QUANTITY='U-VELOCITY' /

&DEVC    ID='V_door',
             XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.82,
             POINTS=15,
             QUANTITY='V-VELOCITY' /

&DEVC    ID='W_door',
             XB= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1.82,
             POINTS=15,
             QUANTITY='W-VELOCITY' /

```

В ходе расчёта вычисляются массовых расход продуктов сгорания, покидающих помещение через проем (QUANTITY = 'MASS FLOW -') и массовый расход воздуха, поступающего в помещение (QUANTITY = 'MASS FLOW +'):

```

&DEVC    XB=-0.4,0.4,0.0,0.0,0,1.82
             QUANTITY = 'MASS FLOW +'
             ID = 'DM_in' / Doorway mass inflow

&DEVC    XB=-0.4,0.4,0.0,0.0,0,1.82
             QUANTITY = 'MASS FLOW -'
             ID = 'DM_out' / Doorway mass outflow

```

В последующих группах &DEVC выводится температура горячего и холодного слоя, а также его высота. Алгоритм вычисления указанных величин в ходе численного расчета приведен в [55].

```
&DEVC    ID='HGL Temp',
          XB=1.0,1.0,0.2,0.2,0,1.82,
          QUANTITY='UPPER TEMPERATURE'/

&DEVC    ID='CGL Temp',
          XB=1.0,1.0,0.2,0.2,0,1.82,
          QUANTITY='LOWER TEMPERATURE'/

&DEVC    ID='HGL Height',
          XB=1.0,1.0,0.2,0.2,0,1.82,
          QUANTITY='LAYER HEIGHT'/
```

Наконец, запрошен вывод полей температуры и массовой доли метана:

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

&SLCF    PBX=0.0,
          QUANTITY='MASS FRACTION',
          SPEC_ID='METHANE' /

&SLCF    PBY=1.4,
          QUANTITY='TEMPERATURE',
          VECTOR=.TRUE. /

&SLCF    PBY=1.4,
          QUANTITY='MASS FRACTION',
          SPEC_ID='METHANE' /

&TAIL /
```

Присутствие параметров QUANTITY = 'TEMPERATURE' и VECTOR = .TRUE. означает, что в Smokeview будут визуализированы векторы скорости газа, окрашенные по температуре.

#### 4.4. Порядок выполнения задания

В соответствии с заданием в файл Steckler.fds необходимо внести следующие изменения.

1. Оценить характерный масштаб длины пламени  $D^*$  по формуле (42). Подобрать параметры сетки в газовой фазе, при которых  $D^*/\Delta x = 7.5$ . Создать равномерную сетку. Размер расчетной области оставить без изменений.

2. Задать геометрию помещения согласно варианту задания:

- Размер проема – с помощью XB в группе &HOLE.
- Положение и размер горелки – с помощью XB в соответствующей группе &VENT.

3. Проверить наличие точек мониторинга температуры и скорости вдоль центральной линии проема, а также массового расхода продуктов сгорания и воздуха через проем.

4. Задать значение удельной мощности тепловыделения (HRRPUA), которая определяется равенством (40).

5. Задать температуру окружающей среды с помощью параметра TMRA.

6. Выполнить расчет. Убедиться в том, что массовые расходы продуктов сгорания и воздуха через проем стабилизировались и стали примерно одинаковыми. Это значит, что течение в проеме стационарно.

7. Заменить граничное условие на поверхностях стен на условие первого рода (холодные непроницаемые стенки, SURF\_ID = 'INERT'). Для этого заменить строки

```
&SURF    ID='FIBER BOARD',
           DEFAULT=.TRUE.,
           MATL_ID='INSULATION',
           THICKNESS=0.1,
           COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3 /
```

на следующие строки:

```
&SURF    ID='INERT',
           DEFAULT=.TRUE.,
           COLOR='YELLOW', TRANSPARENCY=0.3 /
```

Кроме того, необходимо заменить SURF\_ID = 'FIBER BOARD' в строках

группы &OBST с ID 'Right Wall' и 'Ceiling' на SURF\_ID = 'INERT'. Выполнить второй расчет.

8. Заменить граничное условие на поверхностях стен на условие идеальной теплоизоляции (SURF\_ID = 'Adiabatic'). Выполнить третий расчёт.

9. Сравнить результаты расчётов, выполненных для трёх рассмотренных граничных условий с экспериментальными данными, приведенных в табл. 14 и 15. Сравнение выполнить для следующих величин:

- Распределение средней температуры и скорости на вертикальной оси проема (построить графики);
- Температура верхнего и нижнего слоя;
- Положение нейтральной плоскости;
- Положение нижней границы припотолочного слоя;

10. Вычислить массовые расходы продуктов сгорания и воздуха через проем. Сравнить результаты численного расчёта расхода воздуха  $\dot{m}_g$  с результатом расчета по формуле (63). Значение  $h_{in}$  можно определить по экспериментальным данным (табл. 16).

11. Вычислить температуру горячего слоя по методу MQH (с помощью равенства (70)) и с помощью равенства (74), в котором коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется равенством (76), а для массового расхода горячего газа принимается  $\dot{m}_g \approx \dot{m}_{air}$ . Сравнить с результатами численного расчёта для трех граничных условий.

12. С помощью Smokeview визуализировать распределения температуры и скорости газа в вертикальной плоскости симметрии расчётной области, концентрации сажи и форму пламени.

13. Результаты и их обсуждение оформить в виде отчёта.

#### 4.5. Пример расчета

Параметры задачи приведены в табл. 18. Рассматривается сценарий с центральным расположением очага (положение А на рис. 25) и мощностью тепловыделения 62.9 кВт. Размеры проема: ширина  $W = 0.74$ , высота  $H = 1.83$  м, площадь  $A_o = 1.35$  м<sup>2</sup>. Вместо круглой горелки диаметром  $D$  используется

квадратная горелка той же площади (сторона квадрата  $a = \sqrt{\pi D^2/4}$ ). Для данного очага имеем (см. формулы (42) и (43)):  $D^* = 0.31$  м и  $Q^* = 1.1$ . В соответствии с равенством (46) при горении в неподвижном воздухе высота пламени равна  $L_f = 0.9$  м. Параметры расчетной сетки в газовой фазе представлены в табл. 19.

Таблица 18

**Параметры задачи**

Расположение очага	$\dot{Q}$ , кВт	$D$ , м	$a$ , м	$Q''$ , кВт/м <sup>2</sup>	$A_T$ , м <sup>2</sup>	$H$ , м	$W$ , м	$A_o$ , м <sup>2</sup>
A	62.9	0.3	0.266	890	38.74	1.83	0.74	1.35

Таблица 19

**Параметры расчетной сетки в газовой фазе**

$D^*$	$D^*/\Delta x$	$\Delta x$ , м	Размеры расчетной области по каждому направлению			Число ячеек сетки по каждому направлению			Общее число ячеек сетки
			X, м	Y, м	Z, м	$N_x$	$N_y$	$N_z$	
0.31	7.5	0.041	2.8	4.4	3.3	67	106	79	561 058

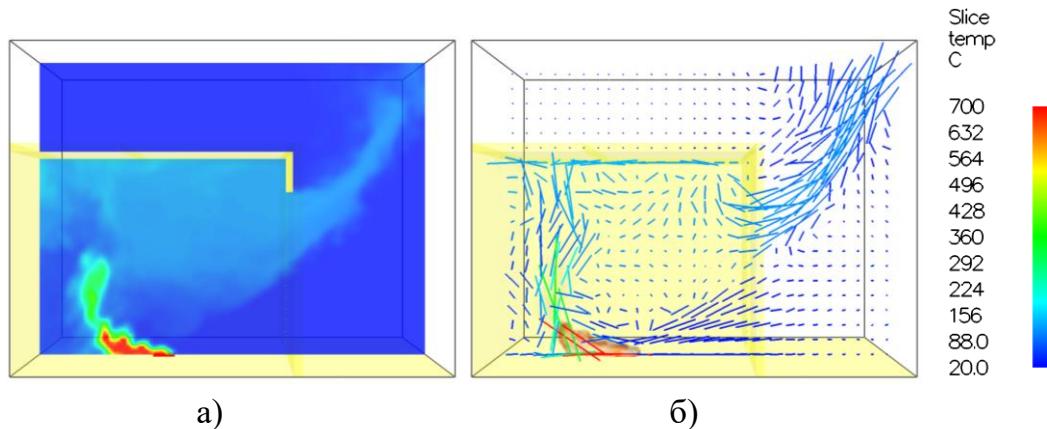


Рис. 31. Визуализация мгновенного поля температуры (а) и векторное поле скорости, окрашенное в значения температуры (б). Момент времени – 825 с

При визуализации результатов расчетов в Smokeview можно заметить, что поток воздуха через проем отклоняет пламя от вертикальной оси (рис. 31). Векторное поле скорости (рис. 31, б) показывает направление и скорость течения газа внутри помещения и за его пределами. На рис. 31, а видно, что в помещении сформировался припотолочный слой, который подпитывается горячим газом, поступающим из пламени.

На рис. 32 показаны профили температуры и скорости в проеме помещения. Расчеты показывают, что если стенки поддерживаются при начальной температуре  $20^{\circ}\text{C}$  (`SURF_ID = 'Inert'`), то расчетная температура газа в проеме оказывается ниже измеренной. Если же стенки предполагаются адиабатическими (`SURF_ID = 'Adiabatic'`), то расчетная температура газа завышена. Наилучшее согласие с результатами измерений наблюдается при учете теплопередачи в материале стен (`SURF_ID = 'Fiber board'`) и использовании сопряженных граничных условий на нагреваемой поверхности.

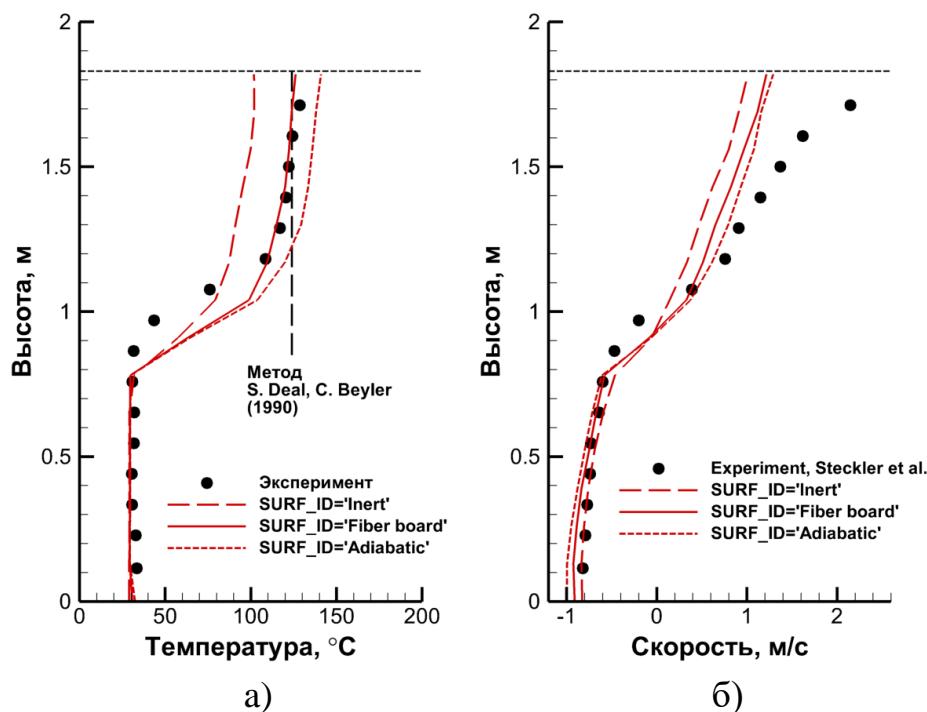


Рис. 32. Зависимость температуры (а) и горизонтальной скорости (б) в проеме. Показано сравнение с экспериментальными данными [46] (табл. 14) и влияние граничного условия на стенах

Зависимости массовых расходов входящего и выходящего потоков газа в проеме от времени ( $\dot{m}_{air}(t)$  и  $\dot{m}_g(t)$ ) показана на рис. 33. Видно, что сначала  $\dot{m}_{air} = 0$  и  $\dot{m}_g > 0$  (проем работает только на выход). Затем формируется входящий поток воздуха, расход которого сравнивается с расходом выходящего газа по мере формирования припотолочного слоя, которое завершается примерно

через 15 мин после начала горения. В установившемся режиме  $\dot{m}_{air} \approx \dot{m}_g \approx 0.52$  кг/с.

С учетом результатов измерений, показанных на рис. 32 и данных табл. 14 и 15, примем  $h_{in} \approx 1.03$  м для высоты нейтральной плоскости и  $T_g \approx 110$  °С для температуры припотолочного слоя. Тогда, используя формулу (63), получим для  $\dot{m}_g$ :

$$\dot{m}_g = 0.7 \cdot 0.74 \cdot \frac{2}{3} (1.83 - 1.03)^{3/2} \cdot 1.2 \sqrt{2 \frac{293}{383} \left(1 - \frac{293}{383}\right) 9.8} = 0.56 \text{ кг/с},$$

что согласуется как с численным расчётом, так и со значением, измеренным в эксперименте (0.563 кг/с).

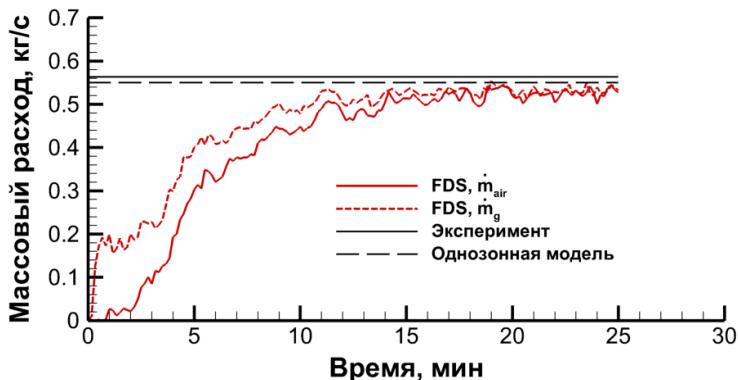


Рис. 33. Зависимость массовых расходов входящего и выходящего потоков в проеме от времени

Температура установившегося припотолочного слоя определяется балансом тепловыделения в очаге и теплопотерь через ограждающие конструкции. В расчетах использованы следующие теплофизические свойства материала конструкций  $\lambda_w = 0.1$  Вт/(м·К),  $c_w = 1000$  Дж/(кг·К),  $\rho_w = 200$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует  $a_w = \lambda_w / (c_w \rho_w) = 5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\lambda_w c_w \rho_w = 2.0 \cdot 10^4$  Вт<sup>2</sup>·с/(м<sup>4</sup>·К<sup>2</sup>). Толщину полагали равной  $\delta = 0.1$  м.

В расчете использовался параметр TIME\_SHRINK\_FACTOR = 20, который показывает, во сколько раз уменьшается теплоемкость материала, чтобы увеличить допустимый шаг по времени для твердой фазы и ускорить сходимость к стационарному состоянию. Следует отметить, что в этом случае физический смысл имеет только стационарное поле температуры в конструкциях.

Рассмотрим установившийся режим, в котором поле температуры в конструкциях стационарно и используем метод [23] (S. Deal, C. Beyler, 1990) для

расчёта температуры припотолочного слоя. В соответствии с формулой (76) после установления стационарного поля температуры для коэффициента теплоотдачи будем иметь  $\alpha = 0.4\lambda_w/\delta = 0.4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{к})$ . Принимая во внимание измеренное значение массового расхода выходящего через проем газа  $\dot{m}_g = 0.56 \text{ кг}/\text{с}$  и применяя равенство (74), получим

$$\Delta T_g = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + \alpha A_T} = \frac{62.9 \cdot 10^3}{0.56 \cdot 1050 + 0.4 \cdot 38.74} = \frac{62.9 \cdot 10^3}{588 + 15.5} = 104 \text{ К},$$

откуда следует, что температура припотолочного слоя равна  $T_g = 124 \text{ }^\circ\text{C}$ . Как показывает рис. 32 (а), это значение согласуется с результатами численного расчета температуры газа, уходящего через проем.

При использовании метода MQH [35] (R. McCaffrey, J. Quintiere, M. Hakleread, 1981) в соответствии с (69) полагаем, что в стационарном режиме (термически тонкий слой)  $\alpha = \lambda_w/\delta = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{к}) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{к})$ . Применяя равенство (71), получим

$$\Delta T_g = 6.85 \left( \frac{\dot{Q}^2}{A_o H^{1/2} \alpha A_T} \right)^{1/3} = 6.85 \left( \frac{62.9^2}{1.35 \cdot 1.83^{1/2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 38.74} \right)^{1/3} = 262 \text{ К},$$

что значительно превышает измеренные значения, результаты численных расчетов и оценку по методу [23] (S. Deal, C. Beyler, 1990).

## **5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ**

Пожарная безопасность зданий заключается в выполнении двух условий, обеспечивающих безопасность людей и сохранение целостности конструкций. Проектная деятельность, направленная на выполнение этих условий, отличается существенно разными подходами.

В первом случае основной интерес представляет прогноз времени блокирования путей эвакуации, которое определяется по достижению предельных значений опасных факторов пожара. Во втором случае обеспечение целостности конструкций подразумевает, что несущие конструкции помещения должны сохранять свои свойства в течение длительного времени (до нескольких часов) в условиях, характерных для полностью развитого пожара после общей вспышки. В этом случае задачей численного моделирования является прогноз поля температуры в конструкциях. Одним из возможных критериев разрушения конструкций является достижение в них предельной температуры.

Опыт, полученный при выполнении предыдущих заданий, достаточен для рассмотрения широкого круга сценариев пожара в открытом пространстве и в помещениях. В качестве последнего задания в данном учебном пособии предлагается выполнить численный расчет развития пожара в реальном помещении и дать прогноз изменения опасных факторов пожара с течением времени.

### **5.1. Опасные факторы пожара**

В основе проектирования пожаробезопасных объектов лежит концепция опасных факторов пожара (ОФП), воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу ([1], ст. 2, п. 17). К опасным факторам пожара, воздействующим на людей и имущество, относятся ([1], ст. 9, п. 1):

- 1) пламя и искры<sup>15</sup>;
- 2) тепловой поток;
- 3) повышенная температура окружающей среды;

---

<sup>15</sup> Здесь приведён общепринятый список в соответствии с Федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1]. Следует отметить, что, в отличие от всех остальных опасных факторов пожара, пламя и искры не являются физическими величинами и не имеют численных значений, для которых можно становить допустимый предел. С этой точки зрения пламя и искры более целесообразно рассматривать не как отдельный фактор, а как причину формирования факторов 2-6.

- 4) повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения;
- 5) пониженная концентрация кислорода;
- 6) снижение видимости в дыму.

Только пять из перечисленных факторов (2-6) имеют численные значения, для которых можно установить допустимый предел. Предельно допустимые значения каждого фактора устанавливаются нормативными документами [2]:

- по повышенной температуре – 70 °С;
- по тепловому потоку – 1400 Вт/м<sup>2</sup>;
- по потере видимости – 20 м;
- по пониженному содержанию кислорода – 0.226 кг/м<sup>3</sup>;
- по токсичным газообразным продуктам горения: CO<sub>2</sub> – 0.11 кг/м<sup>3</sup>, CO – 1.16 г/м<sup>3</sup>, HCl – 23 мг/м<sup>3</sup>.

Прогнозирование ОФП необходимо для последующей количественной оценки рисков [3] и возможного ущерба и применяется как на этапе проектирования и сертификации объекта, так и при расследовании пожаров. Численное моделирование динамики изменения ОФП применяется для прогноза времени блокирования путей эвакуации, оценки эффективности систем обнаружения и тушения пожара, определения тепловых нагрузок на конструкции. Расчёт изменения ОФП с течением времени позволяет определить длительность промежутка времени от начала действия очага пожара до момента достижения предельного значения для данного фактора. Количественный прогноз ОФП, полученный в результате численного моделирования, позволяет сделать вывод о необходимости дополнительных мер, например установки дополнительных средств обнаружения и тушения пожара, вентиляции и дымоудаления, расширения существующих или создания дополнительных путей эвакуации.

## 5.2. Проектный пожар

При выборе сценария возможного пожара особенно важную роль играет определение параметров очага. Концепция *проектного пожара* заключается в том, что для описания динамики очага пожара в этом случае используют наперёд заданные зависимости скорости выгорания пожарной нагрузки от времени. При этом не ставится задача дать прогноз возможного развития *всех* пожаров, которые могут произойти в данном здании. В рамках такого подхода рассматриваются лишь наиболее вероятные и наиболее опасные сценарии.

Важно подчеркнуть, что точной и универсальной методики задания проектного пожара не существует<sup>16</sup>, а выбор рассматриваемых сценариев определяется экспертным путём на основе существующего опыта и всей доступной информации об объекте [3]. В связи со значительной неопределённостью, возникающей при выборе сценариев проектного пожара, требуются многовариантные расчёты и анализ чувствительности прогноза к параметрам проектного пожара.

Таким образом, концепция проектного пожара заключается в априорном задании скорости выгорания пожарной нагрузки, которое происходит в результате термического разложения твердого горючего материала или испарения горючей жидкости. В рамках такого подхода можно также приблизенно моделировать расширяющийся очаг пожара, если задать скорость распространения пламени по их поверхности. Это позволяет не рассматривать процессы, происходящие внутри горючего материала, и выполнять расчёт только газофазного горения при заданных граничных условиях на поверхности пожарной нагрузки. Данный подход будем называть *раздельным* моделированием, так как обратная связь между процессами в газовой фазе и в горючем материале не учитывается.

Альтернативной и более фундаментальной методикой является *совместное* моделирование газофазного горения и термического разложения горючего материала или испарения горючей жидкости. В этом случае скорость газификации пожарной нагрузки определяется тепловым потоком, поступающим в слой горючего материала из пламени, а мощность тепловыделения в газофазном пламени – потоком летучих, образующихся в слое или на его поверхности. При таком подходе как скорость выгорания горючего материала, так и динамика расширения очага не задается заранее, а определяется в ходе расчёта с учётом свойств материала и условий пожара. В последние годы накоплен значительный опыт совместного моделирования воспламенения и горения конденсированных горючих, а также распространения пламени по их поверхности (см., например, работы [11] (Е.С. Маркус, 2020) и [9] (Е.А. Кузнецов, 2020)). Однако практические расчёты, как правило, выполняют с помощью раздельного моделирования в рамках концепции проектного пожара.

---

<sup>16</sup> Более того, для каждого сколь угодно защищённого объекта теоретически возможен такой сценарий, реализация которого предполагает недопустимый ущерб.

**Замечание:**

Концепция проектного пожара подразумевает моделирование горения в газовой фазе, переноса дыма и газообразных продуктов сгорания, а также теплового воздействия на конструкции при заранее заданных параметрах очага.

В численных расчётах с помощью полевых моделей пожара (к которым относится FDS) определение проектного пожара предусматривает задание скорости выгорания  $m''$  охваченных пламенем участков пожарной нагрузки, и площади этих участков. В случае *избытка* кислорода (режим ПРН) имеет место полное сгорание продуктов газификации горючих материалов, и выполняется равенство  $\dot{Q} = \Delta h_c m'' A$ , где  $\Delta h_c$  – теплота сгорания,  $A$  – площадь поверхности. Это значит, что мощность тепловыделения пропорциональна скорости газификации пожарной нагрузки. В случае *недостатка* кислорода (режим ПРВ) фактическое тепловыделение в газофазном пламени определяется потоком кислорода, поступающим в помещение через проемы, и не зависит от скорости газификации пожарной нагрузки. Напомним, что переход пожара из режима, регулируемого нагрузкой, в режим, регулируемый вентиляцией, происходит, в частности, в результате общей вспышки (flashover).

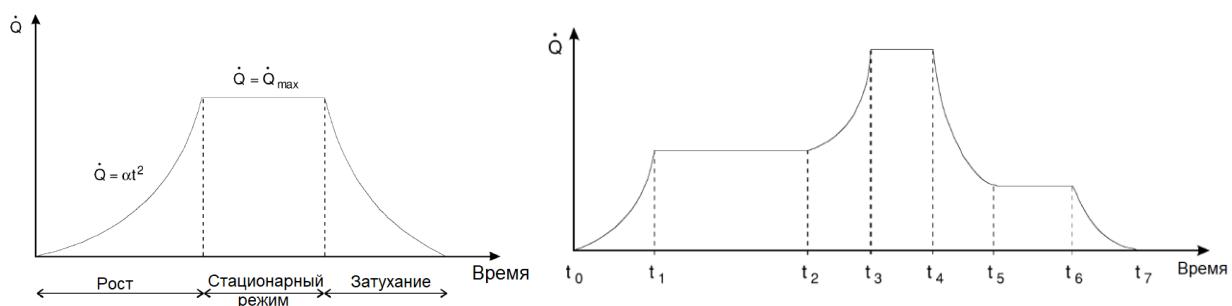


Рис. 34. Примеры зависимости мощности тепловыделения от времени при проектном пожаре [30]

Таким образом, скорость выгорания пожарной нагрузки и соответствующее значение  $Q'' = \Delta h_c m''$  характеризуют *номинальную мощность тепловыделения*, которая предполагает полное окисление газообразного горючего.

**Замечание:**

При построении модели проектного пожара полагают, что независимо от режима пожара (ПРН или ПРВ) скорость выгорания определяется равенством  $m''(t) = Q''(t)/\Delta h_c$ , где

$Q''(t) = \dot{Q}(t)/A$  – удельная мощность тепловыделения,  $\dot{Q}(t)$  – зависимость номинальной (соответствующей полному сгоранию) мощности тепловыделения от времени.

Удельная мощность тепловыделения  $Q''$  задается в исходных данных параметром HRRPUA.

В результате оказывается, что определение проектного пожара эквивалентно заданию зависимости номинальной мощности тепловыделения от времени  $\dot{Q}(t)$ . Примеры таких зависимостей, показанные на рис. 34, состоят из участков, на которых мощность тепловыделения растет, остается постоянной или затухает.

### 5.2.1. Мощность тепловыделения

Рассмотрим начальную стадию пожара, на которой имеет место горение локального очага в условиях избытка кислорода в помещении. При этом мощность тепловыделения растет из-за увеличения теплового потока из растущего пламени и в результате расширения очага. Как показывает опыт, рост мощности тепловыделения протекает с ускорением. Для широкого круга сценариев оказывается, что рост мощности тепловыделения может быть представлен квадратичной зависимостью (закон  $t^2$ ):

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2, \quad (82)$$

где  $t_0$  – момент начала роста мощности тепловыделения (с). Численное значение коэффициента  $\alpha$  ( $\text{kBt}/\text{s}^2$ ) зависит от типа пожарной нагрузки, характерной для данной категории помещений. Значение  $t_0$  зависит не только от свойств пожарной нагрузки, но и от способа воспламенения. В то же время значение коэффициента  $\alpha$  характеризует пожарную нагрузку и режим пожара.

В международных стандартах определены четыре категории пожаров, отличающиеся скоростью роста мощности тепловыделения (см. табл. 20). Выбор надлежащей категории скорости роста мощности тепловыделения зависит от имеющейся информации о распределении горючих материалов в помещении данного типа.

Равенство (82) можно представить в виде эквивалентного равенства

$$\dot{Q} = \dot{Q}_i \left( \frac{t - t_0}{t_i} \right)^2, \quad (83)$$

которое показывает, что коэффициент  $\alpha = \dot{Q}_i / t_i^2$  может быть определён через длительность промежутка времени  $t_i$ , по истечении которого достигается заданный уровень мощности тепловыделения  $\dot{Q}_i$ . В стандарте NFPA [4] принято<sup>17</sup>  $\dot{Q}_i = 1055 \text{ кВт} \approx 1 \text{ МВт}$ . Отметим, что во многих литературных источниках используется значение  $\dot{Q}_i = 1 \text{ МВт}$ .

*Таблица 20*

**Классификация скоростей роста мощности тепловыделения при пожаре [4] (Table F.1(b))**

Скорость роста	$\alpha, \text{кВт}/\text{с}^2$	$t_i, \text{с}$
Низкая (slow)	0.0029	600
Средняя (medium)	0.012	300
Высокая (fast)	0.047	150
Сверхвысокая (ultra-fast)	0.188	75

*Таблица 21*

**Значения коэффициентов для зависимостей (82) и (83) по данным [30, Table 3.4] и [4, Table F.1(a)]**

Пожарная нагрузка	$\alpha, \text{кВт}/\text{с}^2$	$t_i, \text{с}$	$t_0, \text{с}$
Кресло	0.0066- 0.521	45-400	50- 400
Матрас	0.0009- 0.07	120-1080	90- 400
Шкаф (фанера, ДСП), одежда	0.659-1.17	30-40	20- 100
Шкаф (металл), одежда	0.0169- 0.422	50-250	10-60
Шкаф книжный	0.25	65	40
Рулоны, бумага, высота штабеля 6.1 м	1.3-3.6	17-28	
Одежда (хлопок), высота стеллажа 3.7 м	0.57-2.2	22-43	
Картон, плотно упакованный, высота стеллажа 6.1 м	0.0048	470	
Бочки с дистиллятом, высота стеллажа 6.1 м	0.66-1.7	25-40	

<sup>17</sup> Мощность 1055 кВт соответствует 1000 БТЕ/с, где БТЕ (британская тепловая единица) – единица измерения количества тепла (BTU, British Thermal Unit). 1 БТЕ – это количество тепла, необходимое для нагрева 1 фунта воды на 1 градус Фаренгейта.

Примем в качестве начала отсчёта времени момент  $t = t_0$ . Тогда для построения модели проектного пожара, содержащей участки с растущей и постоянной мощностью тепловыделения, необходимо задать две величины:  $\alpha$  (или  $t_i$ ) и  $\dot{Q}_{\max}$ . Отметим, что значение  $\dot{Q}_{\max}$  можно вычислить по формуле  $\dot{Q}_{\max} = Q''_{\max} A$ , если известна величина  $Q''_{\max}$  (HRRPUA) и соответствующая площадь поверхности  $A$ . В свою очередь, если известен горючий материал, то величина  $Q''_{\max}$  оценивается по формуле (40):  $Q''_{\max} = \Delta h_c m''$ , где  $m''$  – массовая скорость выгорания материала, а  $\Delta h_c$  – теплота сгорания (см. табл. 9).

Исходные данные для построения модели проектного пожара, полученные по результатам натурных испытаний, приведены в табл. 21, 22 и 23.

*Таблица 22*

**Максимальная мощность тепловыделения [21, 30]**

Пожарная нагрузка		$\dot{Q}_{\max}$ , кВт
Сигарета		0.005
Мониторы	1 поддон, 12 коробок	4600-6400
	2 поддона, 10-12 коробок	14100-17300
Занавес (хлопок, вискоза, полиэстер)	100-370 г/м <sup>3</sup>	100-660
	Хлопок, 13 кг	40
	Неопрен, 18 кг	70
Матрас	Пенополиуретан, 4-14 кг	760-2630
	Латекс, 19 кг	2720
Занавес (хлопок, вискоза, полиэстер)	100-370 г/м <sup>3</sup>	100-660
	Сталь, одежда 2 кг	270
Шкаф	Фанера 37-68 кг, одежда 2 кг	2900-6400
	ДСП 120 кг, одежда 1 кг	1900
Горение над разливом бензина	1 м <sup>2</sup>	2500
Штабель пиломатериалов, высота 3 м		7000
Пластиковые стаканы в картонных коробках, высота 5 м	2 м <sup>2</sup> ,	> 30 000

При стеллажном складировании пожарной нагрузки коэффициент  $\alpha$  пропорционален высоте стеллажа, а время достижения мощности 1 МВт обратно пропорционально высоте стеллажа [4]. Эту закономерность нужно учитывать при определении скорости роста мощности тепловыделения при произвольной

высоте стеллажа.

Таблица 23

**Мощность тепловыделения при горении разных видов пожарной нагрузки [4, 30]**

Вид пожарной нагрузки		$Q''_{\max}$ , кВт/м <sup>2</sup>	$t_i$ , с
Мебель с обивкой, в зависимости от веса и материалов		170-5100	
Мешки с почтой, штабель высотой 1.5 м		400	190
Обработка антиприреном		17	
Матрас	Хлопок, полиэстер	565	
	Полиуретан	910	
	Пустые	1700	60
	Бутылки (полиэтилен)	2000- 6200	55-85
Картонные коробки, высота штабеля 4.5 м	Бутылки (поливинилхлорид)	3400	9
	Предметы из полипропилена	4400	10
	Предметы из полистирола	2000- 5400	110-120
	Пластиковые стаканы (полисти- рол)	14200	55
Рулоны, пленка (полипропилен, полиэтилен), высота штабеля 4.1 м		6200	40
Рулоны, бумага, высота штабеля 6.1 м			17-28
Шкаф с одеждой		2550- 6800	
	Метанол	740	
Разлив горючей жид- кости	Керосин	1700	
	Машинное масло	1700	
	Дизельное топливо	1990	
	Бензин	2500	
Пенополиуретан, плиты, высота штабеля 4.6 м		1900	8
Пенополистирол, плиты, высота штабеля 4.2 м		3300	7
	Высота 0.5 м	1420	160-320
Штабель из брусков, древесины,	Высота 1.5 м	4000	90-190
	Высота 3 м	6800	80-120
	Высота 5 м	10200	75-120

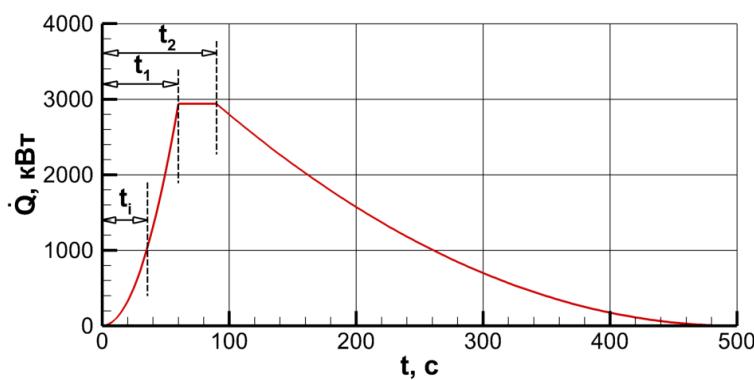


Рис. 35. Аппроксимация зависимости мощности тепловыделения от времени при горении шкафа с одеждой

Таблица 24

**Динамика мощности тепловыделения при горении некоторых предметов интерьера<sup>18</sup> (по данным [32])**

Предметы интерьера	Рост			Стационарный режим		Затухание		$t_{end}$ , с	$\Delta Q$ , МДж
	$t_i$ , с	$t_1$ , с	$\alpha$ , кВт/с <sup>2</sup>	$\dot{Q}_{max}$ , кВт	$t_2 - t_1$ , с	$t_{end} - t_2$ , с	$\alpha$ , кВт/с <sup>2</sup>		
Шкаф фанерный с одеждой	30-90	60-150	0.12-1.1	2780-6250	10-30	30-410	0.017-6.9	140-500	330-760
Кресло, дерево, пенополиуретан, обивка	75-540	50-450	0.003-0.18	200-4000	0-220	250-1000	0.00044-0.064	420-1930	67-1480
Новогодняя елка	330	320	0.73	660	30	130	0.04	480	54
Матрас	170-860	150-600	0.002-0.038	42-1580	0-370	160-1250	0.0027-0.038	480-2230	160-1250
Корзина для бумаг	100	60	0.1	340	50	410	0.002	520	70

Данные о горении нескольких десятков предметов интерьера жилых помещений приведены в работе<sup>19</sup> [32] (H.-J. Kim, D.G. Lilley, 2000), где зависимости мощности тепловыделения представлены в виде последовательности трех

<sup>18</sup> Определение моментов времени см. на рис. 35.

<sup>19</sup> Этот набор данных также приводится на сайте <https://www.thunderheadeng.com/2015/08/heat-release-rates-of-burning-items-in-fires/>, где имеется специальный калькулятор для расчёта зависимости мощности тепловыделения от времени.

участков (рис. 35). Эти данные использованы в табл. 24, где приводятся интервалы значений для нескольких видов пожарной нагрузки.

Приведенные данные показывают, что наблюдаемый диапазон параметров, характеризующих динамику мощности тепловыделения для предметов из одной и той же группы, очень широк. Это обусловлено различиями в видах используемых материалов и их массе. Отметим, что формулировка сценария проектного пожара также включает определение формы и размеров каждого предмета.

**Замечание:**

Формулировка сценария проектного пожара означает принятие решения о форме и размерах отдельных предметов пожарной нагрузки и выборе ожидаемой зависимости мощности тепловыделения от времени. Отношение мощности тепловыделения  $\dot{Q}$  к площади горящей поверхности дает значение  $Q''$ , которое задается параметром HRRPUA в исходных данных.

Квадратичную зависимость мощности тепловыделения от времени можно интерпретировать не только как результат увеличения скорости выгорания  $m''$  (и, следовательно, удельной мощности тепловыделения  $Q'' = \Delta h_c m''$ ), но и как следствие увеличения площади очага. Если очаг имеет форму круга, границы которого расширяются с постоянной скоростью  $V_0$ , то для мощности тепловыделения получим:

$$\dot{Q}(t) = Q'' A(t) = Q'' \frac{\pi R^2(t)}{4} = Q'' \frac{\pi}{4} V_0^2 t^2 = \alpha t^2, \text{ где } \alpha = Q'' \frac{\pi}{4} V_0^2. \quad (84)$$

Равенство (84) показывает, что при заданной удельной мощности тепловыделения  $Q''$  задание коэффициента  $\alpha$  эквивалентно заданию линейной скорости расширения очага  $V_0$ .

Рекомендации по выбору характеристик пожарной нагрузки приводятся, в частности, в [5, 8, 21, 22, 30, 42] и других изданиях.

### 5.2.2. Образование сажи и угарного газа

Помимо мощности тепловыделения модель проектного пожара должна содержать информацию о количестве дыма (сажи) и токсичных продуктов, образующихся при горении. Детальное моделирование образования сажи и токсичных газов представляет сложную задачу, а существующие теоретические подходы апробированы лишь для ограниченного количества горючих. В связи с этим в FDS используется приближённый подход, в рамках которого пользователь задает в исходных данных долю массы горючего, которая преобразуется в сажу и CO. Значения этих величин, измеренные в диффузионных пламенах для разных горючих и в разных режимах горения, приведены в табл. 25.

Выход сажи и CO зависит от режима горения (пламя или тление) и от концентрации кислорода. Нижняя граница диапазона, указанного в табл. 25, как правило, соответствует пламенному горению в воздухе, а верхняя – тлению или горению при пониженной концентрации кислорода. Эксперименты показывают, что существует корреляция между выходом сажи  $y_c$  и угарного газа  $y_{CO}$  при диффузионном горении. В работе [33] (U.O. Koyle, G.M. Faeth, 1991) при обработке данных по горению широкого круга жидкых и газообразных углеводородных горючих получено следующее соотношение

$$y_{CO} = 0.0014 \frac{M_c}{M_{fuel}} + 0.37 y_c, \quad (85)$$

где  $M_{fuel}$  – молярная масса горючего. Равенство (85) можно использовать для приближенной оценки выхода CO по известному выходу сажи.

Задание постоянного, наперед заданного выхода сажи и CO при горении является сильным допущением, которое не позволяет учесть зависимость скорости образования сажи и CO от температуры, концентраций горючего и окислителя, особенностей поля скорости, которые обуславливают время пребывания реагентов в пламени. Несмотря на существование моделей разной степени сложности, проблема детального моделирования образования и окисления сажи к настоящему времени не решена, а предсказание выхода CO из пламени возможно лишь при использовании многостадийных химических механизмов окисления горючих. Отметим, что в работах [45] и [9] для расчёта образования сажи использована математическая модель, в которой учитывается спонтанное

образование частиц-зародышей с последующей коагуляцией этих частиц, конденсацией углерода на их поверхности и их окислением. Такой подход не требует априорного задания выхода сажи, а предсказывает его в ходе расчёта.

*Таблица 25*

**Выход сажи и моноксида углерода в диффузионном пламени [47, 40 и др.]**

Горючее	Выход сажи, г/г горючего	Выход CO, г/г горючего
<i>Твердые горючие материалы</i>		
Древесина	0.008-0.1	
Нейлон	0.07	
Поливинилхлорид	0.03-0.12	0.07-0.43
Полиуретан	0.03-0.2	0.03-0.06
Полистирол	0.13-0.2	0.06
Полипропилен	0.016-0.1	0.025
Полиметилметакрилат	0.02	0.01
Полиэтилен	0.05-0.08	0.027
Полиэстер	0.09	0.08
Поликарбонат	0.11	0.05
<i>Жидкости</i>		
Толуол	0.15-0.18	0.07
Бензол	0.14-0.19	0.07
н-Гептан	0.03-0.04	0.01
Октан	0.06	
Керосин	0.07	
Изопропанол	0.002	
Ацетон	0.01-0.02	0.003
Этанол	0-0.002	0.008
Метанол	0-0.001	0.001
<i>Газы</i>		
Ацетилен	0.1-0.2	0.04
Метан	0-0.01	0.0007-0.0017
Пропан	0.01-0.03	0.005
Пропилен	0.06-0.12	
Этилен	0.02-0.05	

### 5.2.3. Дальность видимости

Одним из опасных факторов пожара является снижение дальности видимости. Дальность видимости определяется распределением концентрации сажи в направлении взгляда. Однако в практических расчётах редко рассматривают зависимость дальности видимости от направления. Вместо этого вычисляют локальную дальность видимости, которая зависит от концентрации дыма в данной точке. Такой подход оценивает дальность видимости, соответствующую заполнению всего пространства дымом с характеристиками, соответствующими данной точке. Указанное допущение определяет дальность видимости как скалярную величину, обусловленную локальными свойствами дыма. Ещё раз отметим, что в реальных условиях дальность видимости различна в разных направлениях взгляда и зависит от распределения концентрации дыма в данном направлении.

Локальная дальность видимости вычисляется по данным о парциальной плотности сажи  $\rho_{soot}$  (масса сажи в единице объёма смеси продуктов сгорания и воздуха, кг/м<sup>3</sup>), которая вычисляется в FDS. Для расчёта локальной дальности видимости используют формулу

$$L_{vis} = \frac{C_{vis}}{\kappa \rho_{soot}}, \quad (86)$$

где  $\kappa = 8700$  м<sup>2</sup>/кг – массовый коэффициент ослабления оптического излучения [39] (G.W. Mulholland, C. Croarkin, 2000),  $C_{vis}$  – коэффициент, зависящий от типа наблюдаемого объекта. В работе [29] (T. Jin, 2002) рекомендуется принимать  $C_{vis} = 8$  для светящихся объектов и  $C_{vis} = 3$  для несветящихся объектов. Чтобы указать на необходимость вывода результатов расчета локальной дальности видимости используется переменная 'VISIBILITY' в группе &MISC.

Важно помнить, что расчётная плотность сажи  $\rho_{soot}$  и, следовательно, дальность видимости  $L_{vis}$  пропорциональна значению параметра SOOT\_YIELD, задаваемому в исходных данных (группа &REAC в fds-файле). Неопределённость в задании выхода сажи нужно принимать во внимание при интерпретации результатов расчётов.

### 5.3. Применение FDS

Принципы определения расчетной области и построения расчетной сетки описаны выше в разделе 4.3.1. Если рассматривается жилое помещение или офис, то большая часть пожарной нагрузки представлена предметами мебели, которые интерпретируются в FDS как препятствия для течения газа. Рассмотрим подробнее метод задания геометрии предметов мебели и задания граничных условий на их поверхности с учётом скорости выгорания.

Для задания размеров препятствий используется группа &OBST. Минимальный размер препятствия должен соответствовать размеру ячейки сетки в газовой фазе (задается в группе &MESH). Если размер препятствия меньше размера ячейки сетки, то вместо объемного тела появится плоскость (в этом случае возможны ошибки при запуске FDS).

Поскольку расчетная сетка состоит из прямоугольных ячеек, в практических расчетах форма препятствий упрощается, как показано на рис. 36.

**Совет:** Если реальный объект имеет сложную форму, то рекомендуется ее упростить, сохранив при этом суммарную площадь поверхности.

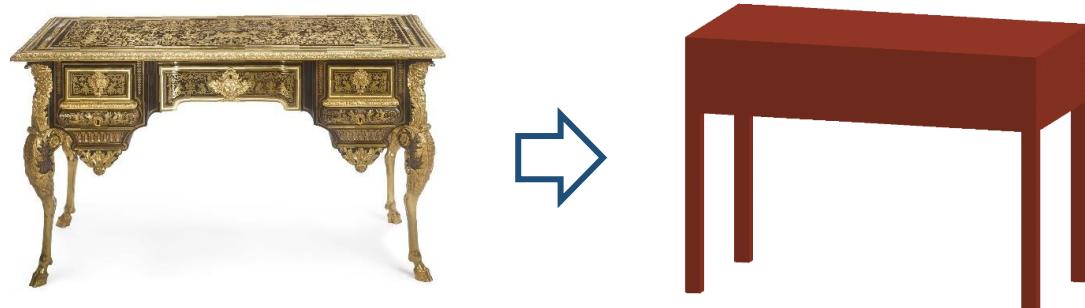


Рис. 36. Пример упрощения формы геометрических объектов в FDS

При создании fds-файла для большой задачи со сложной геометрией использование текстовых редакторов может оказаться неудобным. В этом случае мы рекомендуем использовать PyroSim или BlenderFDS<sup>20</sup>. Для выполнения данного задания достаточно использовать стандартные функции FDS и текстовый редактор.

<sup>20</sup> См. <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/> и <https://firetools.github.io/blenderfds/>.

**Замечание:**

В последних версиях FDS есть возможность создания более сложных объемных фигур с помощью группы &GEOM.

Форму стола, показанного справа на рис. 36, задают следующие строки, соответствующие столешнице и четырем ножкам:

```
&OBST    ID='Tabletop',
          XB=0,1.2,0,0.6,0.6,0.85,
          SURF_ID='Table',
          COLOR='BURNT UMBER'/

&OBST    ID='Tableleg1',
          XB=0,0.05,0,0.05,0.0,0.6,
          SURF_ID='Table',
          COLOR='BURNT UMBER'/

&OBST    ID='Tableleg2',
          XB=0,0.05,0.55,0.6,0.0,0.6,
          SURF_ID='Table',
          COLOR='BURNT UMBER'/

&OBST    ID='Tableleg3',
          XB=1.15,1.2,0,0.05,0.0,0.6,
          SURF_ID='Table',
          COLOR='BURNT UMBER'/

&OBST    ID='Tableleg4',
          XB=1.15,1.2,0.55,0.6,0.0,0.6,
          SURF_ID='Table',
          COLOR='BURNT UMBER'/
```

На поверхности стола зададим граничное условие SURF\_ID = 'Table'. Оно соответствует заданию удельной мощности тепловыделения (HRRPUA), которая изменяется во времени согласно функции RAM\_Q = 'Table\_RAMP':

```
&SURF    ID='Table',
          HRRPUA=360,
          RAM_Q='Table_RAMP'/
```

Функция RAM\_Q позволяет задать кусочно-линейную зависимость удельной мощности тепловыделения от времени:

```

&RAMP ID='Table_RAMP', T=0, F=0/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=25, F=0.0625/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=50, F=0.25/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=75, F=0.5625/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=100, F=1/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=300, F=1/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=325, F=0.5625/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=350, F=0.25/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=375, F=0.0625/
&RAMP ID='Table_RAMP', T=400, F=0/

```

В момент времени  $T$  удельная мощность тепловыделения становится равной  $F \times \text{HRRPUA}$ , где значение HRRPUA задано в группе &SURF. Приведенные выше строки задают зависимость  $Q''(t)$ , показанную на рис. 37 и учитывающую рост скорости выгорания от 0 до 100 с, постоянное значение от 100 до 300 с и снижение от 300 до 400 с. Время  $T$  отсчитывается от начала расчета.

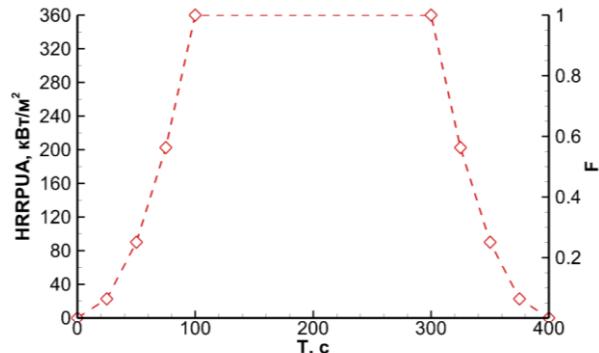


Рис. 37. Зависимость удельной мощности тепловыделения от времени, заданная в SURF\_ID = 'Table'

**Замечание:** Группа &RAMP задает кусочно-линейную функцию  $Q''(t)$ . Задав достаточно большое число точек, можно приблизенно воспроизвести квадратичную зависимость или другую нелинейную функцию.

При условии полного сгорания летучих внутри расчетной области мощность тепловыделения составит  $\dot{Q}(t) = A Q''(t)$ , где  $A$  – площадь поверхности, на которой задано граничное условие SURF\_ID = 'Table' (на поверхности стола). Максимальная мощность тепловыделения в рассматриваемом случае составит 1011.6 кВт.

Альтернативный способ задать увеличение расхода горючего газа, поступающего в расчетную область, заключается в программировании расширяющегося очага. Например, если в fds-файле присутствует группа

```
&VENT SURF_ID='Burner',
XB=28.00,28.00,8.90,10.20,3.90,5.90,
RGB=255,51,0,
XYZ=28.00,8.9,5.90,
SPREAD_RATE=0.0200/
```

то рассматриваемый очаг имеет центр в точке XYZ, а его границы расширяются с постоянной скоростью, заданной параметром SPREAD\_RATE ( $V_0 = 0.02 \text{ м/с}$ ). В результате формируется очаг в форме круга, радиус и площадь которого растут с течением времени. При этом мощность тепловыделения (в случае полного сгорания) определяется равенством (84).

**Замечание:**

Изменение тепловой мощности очага можно задать как за счет изменения скорости выгорания (через параметр RAMP\_Q в группе &SURF), так и за счет изменения его площади (через параметр SPREAD\_RATE в группе &VENT).

Если в объеме помещения имеет место недостаток кислорода, то мощность тепловыделения определяется фактическим наличием кислорода и она становится меньше, чем номинальная мощность тепловыделения  $AQ''(t)$ . В этом случае в ячейках сетки остается несгоревшее горючее, которое может воспламениться после перемещения данной порции газовой смеси за пределы помещения. Это происходит в режиме пожара, регулируемом вентиляцией (ПРВ) и сопровождающимся выбросом пламени через проем в соседние помещения или в открытое пространство.

**Замечание:**

Зависимость фактической мощности тепловыделения от времени, которая определяется в результате численного расчёта по скорости потребления горючего в объеме расчетной области, выводится в файл CHID\_hrr.csv. В первом столбце выводится время в секундах, а во втором – текущее значение  $\dot{Q}$  в кВт. Расшифровка остальных значений приводится в [55].

Для каждого предмета пожарной нагрузки нужно задать свое граничное условие. При этом можно задать моменты времени, в которые начинается горение каждого предмета. В частности, если второй предмет должен воспламениться через  $n$  секунд после первого, то для него зависимость  $F$  от  $T$  сдвигается вправо на  $n$  секунд.

#### **5.4. Порядок выполнения задания**

Задание предполагает самостоятельный выбор рассматриваемого помещения и сценария пожара. Выберите жилую комнату, рабочий офис, аудиторию, торговый зал, автомобильный паркинг или иное помещение с проёмом и горючими материалами внутри. При необходимости включите в модель смежное помещение или коридор. Учтите возможное расположение горючих материалов, которые входят в состав мебели, оргтехники, складируемых товаров, возможных разливов горючих жидкостей.

Рекомендуется рассматривать помещения с размерами не менее размера жилой комнаты с одним или несколькими открытыми проемами (дверь, окно и т.п.). Внутри помещения должно быть расположено не менее трёх предметов, составляющих пожарную нагрузку. Если в качестве пожарной нагрузки рассматриваются предметы мебели, автомобили и т.п., то их размеры должны соответствовать реальным.

Задайте возможное положение очага пожара и зависимость мощности тепловыделения от времени с учетом приведенных ниже рекомендаций и выполните расчёт изменения во времени полей следующих величин:

температуры;

концентрации кислорода и газообразных продуктов сгорания;

объёмной доли сажи;

локальной дальности видимости;

тепловых потоков на твердых поверхностях.

Задайте контрольную точку (например, на высоте человеческого роста в дверном проеме) и определите момент времени, в который достигаются предельные значения опасных факторов пожара в контрольной точке.

Вычислите температуру припотолочного слоя, координаты его нижней границы, температуру и скорость на вертикальной оси проема и расходы входящего и выходящего газовых потоков в зависимости от времени. Сравните эти

величины с теоретическими оценками, приведёнными выше в главе 4.

В качестве практического примера выполнения такого задания в следующем разделе рассмотрим развитие проектного пожара в помещениях информационно-телекоммуникационного комплекса СПбПУ. Целью расчёта является определение времени блокирования путей эвакуации, которое определяется по достижению предельных значений температуры, концентраций CO, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, а также локальной дальности видимости.

Более сложные примеры моделирования динамики пожара на промышленном объекте с учетом активации спринклерных оросителей и пожаротушения имеются в работе [19] (А.С. Цой, 2016).

## 5.5. Проектный пожар в помещениях вычислительного центра<sup>21</sup>

Рассматриваемая часть здания представляет трехэтажное сооружение, Г-образное в плане с размерами в осях 26 м на 21 м (см. рис. 38).

Рассматриваемые сценарии проектного пожара отличаются характеристиками и расположением очага пожара, а также наличием вскрытых оконных проёмов. Предполагается, что очаг пожара либо находится в серверном помещении (сценарий №1), либо в дисплейном классе (сценарий №2). В последнем случае рассматривается как пожар, регулируемый нагрузкой (окна в помещении с очагом пожара закрыты), так и пожар, регулируемый вентиляцией (окна открыты).

В расчётах определяется изменение температуры и концентраций компонентов дыма (CO, CO<sub>2</sub>, сажа) и O<sub>2</sub> во времени в заданных контрольных точках 1-10 (рис. 38, табл. 26). Полагали, что за промежуток времени, рассматриваемый в данной работе (не более 15 мин от момента зажигания), температура стен и перекрытий не отклоняется от своего начального значения 20°C. Соответствующий фрагмент fds-файла для контрольной точки №1 имеет вид:

```
&DEVC XYZ=28.5, 11.5, 5.6, QUANTITY='TEMPERATURE', DEVC_ID='1 Temperature'#/1
&DEVC XYZ=28.5, 11.5, 5.6, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon monoxide', DEVC_ID='1 CO density'#/1
```

---

<sup>21</sup> В данном разделе использованы результаты расчетов, выполненных А.С. Цой (Отчёт о НИР «Моделирование и визуализация проектного пожара в помещениях вычислительного центра университета и определение времени блокирования путей эвакуации людей», СПбПУ, 2010). Использовалась версия FDS 5.5.

```

&DEVC XYZ=28.5, 11.5, 5.6, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='carbon di-
oxide', DEVC_ID='1 CO2 density'#/1
&DEVC XYZ=28.5, 11.5, 5.6, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='oxygen',
DEVC_ID='1 O2 density'#/1
&DEVC XYZ=28.5, 11.5, 5.6, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='soot',
DEVC_ID='1 soot density'#/1

```



а) Второй этаж



б) Третий этаж

Рис. 38. Планы второго (а) и третьего (б) этажей рассматриваемого объекта. Граница расчётной области выделена цветом. Числами 1-10 обозначены места расположения контрольных точек (на высоте 17 м над уровнем пола данного этажа или уровне ступеней лестничного проёлта)

В расчётах используется многоблочная декартовая сетка с числом элементов 575 000 (рис. 39). Максимальный размер ячеек составляет 20 см, минимальный – 10 см (в зоне горения). В большей части расчётной области используется равномерная сетка с формой элементов, близкой к кубической.

**Совет:** Создание расчетной области для такого сценария удобнее выполнять с помощью PyroSim, BlenderFDS и других программ, позволяющих работать с CAD-форматом (см. приложение П2).

Таблица 26

## Положение контрольных точек

№ контрольной точки	Положение
1	3й этаж, дверной проём серверного помещения
2	3й этаж, центр коридора между дисплейным классом и серверным помещением
3	3й этаж, дверной проём дисплейного класса
4	3й этаж, дверной проём коридора
5	3й этаж, дверной проём из коридора на лестницу
6	Между 2м и 3м этажом на лестничной клетке
7	2й этаж, дверной проём из коридора на лестницу
8	2й этаж, дверной проём в коридор, соединяющий главное здание и 4 корпус
9	2й этаж, центр коридора
10	2й этаж, дверной проём в коридор, ведущий в столовую

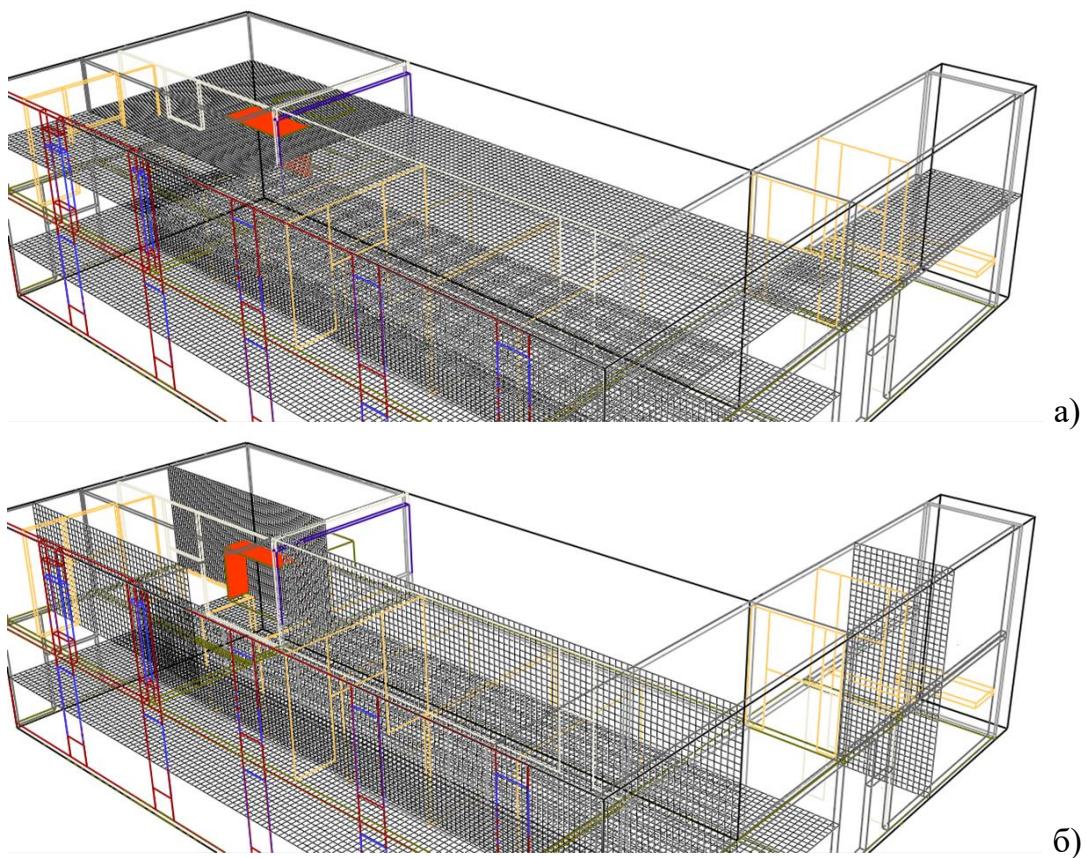


Рис. 39. Расчётная сетка: а) – горизонтальные сечения, б) – вертикальные сечения. Цветом выделена горящая поверхность в сценарии №1

### 5.5.1. Описание сценариев пожара

Особенности рассматриваемых сценариев приведены в табл. 27. В первом сценарии предполагается, что очаг горения находится в одной из стоек сервера в серверном помещении (рис. 38) на третьем этаже. В качестве горючего материала рассматривается вещество с эффективным составом  $C_1H_1O_{0.4}$  (пластмасса). Предполагается, что зажигание происходит в одном из углов шкафа, после чего пламя распространяется вдоль трёх боковых поверхностей шкафа, имеющих общий угол в точке зажигания. Скорость распространения передней кромки зоны горения постоянна, одинакова во всех направлениях и равна 0.02 м/с, что соответствует режиму сверхвысокой скорости роста в соответствии с табл. 20 ( $\alpha = Q''\pi V_0^2/4 = 500 \times \pi \times 0.02^2/4 = 0.157$  кВт/с<sup>2</sup>). После полного охвата пламенем всех указанных поверхностей общая площадь, охваченная пламенем, составляет 12.5 м<sup>2</sup>. Мощность тепловыделения с единицы площади принимается равной 500 кВт/м<sup>2</sup>, что в режиме полностью развитого пожара даёт тепловую мощность 6.25 МВт. Свойства очага заданы в fds-файле следующими строками:

```
&VENT SURF_ID='Burner', XB=28.00,28.00,8.90,10.20,3.90,5.90,  
    RGB=255,51,0, XYZ=28.00,8.9,5.90, SPREAD_RATE=0.0200/ Очаг  
&VENT SURF_ID='Burner', XB=25.00,28.00,8.90,10.20,5.90,5.90,  
    RGB=255,51,0, XYZ=28.00,8.9,5.90, SPREAD_RATE=0.0200/ Очаг  
&VENT SURF_ID='Burner', XB=25.00,28.00,8.90,8.90,3.90,5.90,  
    RGB=255,51,0, XYZ=28.00,8.9,5.90, SPREAD_RATE=0.0200/ Очаг
```

В первом сценарии открыты все двери в коридоре, а также двери комнаты с сервером и двери дисплейного класса на третьем этаже. Кроме того, открыты двери эвакуационных выходов на втором этаже. Двери кабинетов на втором и третьем этажах закрыты. Окно в коридоре, находящееся напротив двери в комнату с сервером, открывается на 600й секунде после зажигания.

В рамках второго сценария предполагается, что горит офисная мебель (древесина, пластик) и бумага в дисплейном классе на третьем этаже (рис. 38). Химический состав горючего материала описывается формулой  $C_1H_2O_{1.15}$  (80% целлюлозы и 20% полиэтилена). Предполагается, что зажигание происходит в одном из углов горизонтальной поверхности стола, после чего пламя распространяется вдоль указанной поверхности. Аналогично первому сценарию скорость распространения передней кромки зоны горения постоянна, одинакова во

всех направлениях и равна 0.02 м/с, что соответствует режиму сверхвысокой скорости роста пожара. После полного охвата пламенем всех указанных поверхностей общая площадь, охваченная пламенем, составляет 8 м<sup>2</sup>. Мощность тепловыделения с единицы площади полагали равной 600 кВт/м<sup>2</sup>.

*Таблица 27*

**Характеристики очага пожара для сценариев проектного пожара**

	Сценарий № 1	Сценарий № 2
Размер и расположение	Вертикальные поверхности шкафа в серверном помещении, площадь 12.5 м <sup>2</sup>	Горизонтальная поверхность в дисплейном классе, площадь 8 м <sup>2</sup>
Тип и состав горючего	Пластик, C <sub>1</sub> H <sub>1</sub> O <sub>0.4</sub>	Пластик, древесина, бумага C <sub>1</sub> H <sub>2</sub> O <sub>1.15</sub>
Скорость распространения границы очага	0.02 м/с	0.02 м/с
Режим нарастания пожара	Сверхбыстрый (ultra-fast)	Сверхбыстрый (ultra-fast)
Максимальная тепловая мощность	6.25 МВт	4.8 МВт
Выход CO	0.1	0.1
Выход сажи	0.1	0.1

Предполагается, что из-за высокой температуры в помещении вскрывается один оконный проём в дисплейном классе через 180 с после начала горения. Открыты все двери в коридоре, двери серверного помещения и дисплейного класса на третьем этаже, а также двери эвакуационных выходов на втором этаже.

### 5.5.2. Результаты расчетов

Визуализация распространения дыма для сценария №1 показана на рис. 40. Видно, что в течение первых двух минут после зажигания формируется припотолочный слой продуктов сгорания в серверном помещении. Затем продукты сгорания проникают в коридор через открытый дверной проём.

На четвёртой минуте дым достигает угла коридора и начинает заполнять припотолочную область в той его части, которая ведёт к лестнице. На шестой

минуте дым проникает на лестницу. В дальнейшем дымом заполняется верхняя часть лестничного пролёта, на второй этаж дым практически не поступает. В связи с этим в контрольных точках 7-10, расположенных на втором этаже, не наблюдается отклонений от начальных значений температуры и концентрации.

На рис. 42 показана зависимость тепловой мощности очага от времени для двух сценариев, представленных в табл. 27. Видно, что в сценарии №1 горение выходит на стационарный режим (6.25 МВт) в течение 3 мин. Имеет место полное сгорание горючего, причём пламя располагается над горящими поверхностями (рис. 40). Следовательно, развитие пожара в данном сценарии протекает в режиме, регулируемом нагрузкой.

Режим горения в сценарии №2 отличается: на четвертой минуте пламя и поток продуктов сгорания прорываются в оконный и дверные проёмы, что указывает на исчерпание кислорода в помещении дисплейного класса, где находится очаг. Это сопровождается временным снижением мощности тепловыделения, которое выходит на стационарный уровень (4.8 МВт) после формирования пламени за пределами дисплейного класса (рис. 42). Можно заключить, что в сценарии №2 горение протекает в режиме, регулируемом вентиляцией.

Анализ рис. 43, 44 и 45 позволяет определить моменты времени, в которые для сценария №1 достигаются предельные значения опасных факторов пожара по температуре, концентрациям CO и O<sub>2</sub>. Аналогично определяется момент снижения дальности видимости до предельной. Указанные моменты времени соответствуют времени блокирования пути эвакуации в данной точке (см. табл. 28, значения слева от дробной черты). Расчёт показывает, что блокирование путей эвакуации на втором этаже здания не ожидается.

Визуализация распространения дыма для сценария №2 показана на рис. 41. Видно, что в результате быстрого формирования припотолочного слоя и снижения его нижней границы дым из дисплейного класса начинает поступать в коридор уже на второй минуте после воспламенения. Поток дыма распространяется по коридору в двух направлениях: в сторону серверного помещения и в сторону лестницы. На третьей минуте дым поступает в серверное помещение и в лестничный пролёт. На четвертой минуте пламя и поток продуктов сгорания прорывается в оконный и дверные проёмы, что указывает на исчерпание кислорода в помещении дисплейного класса.

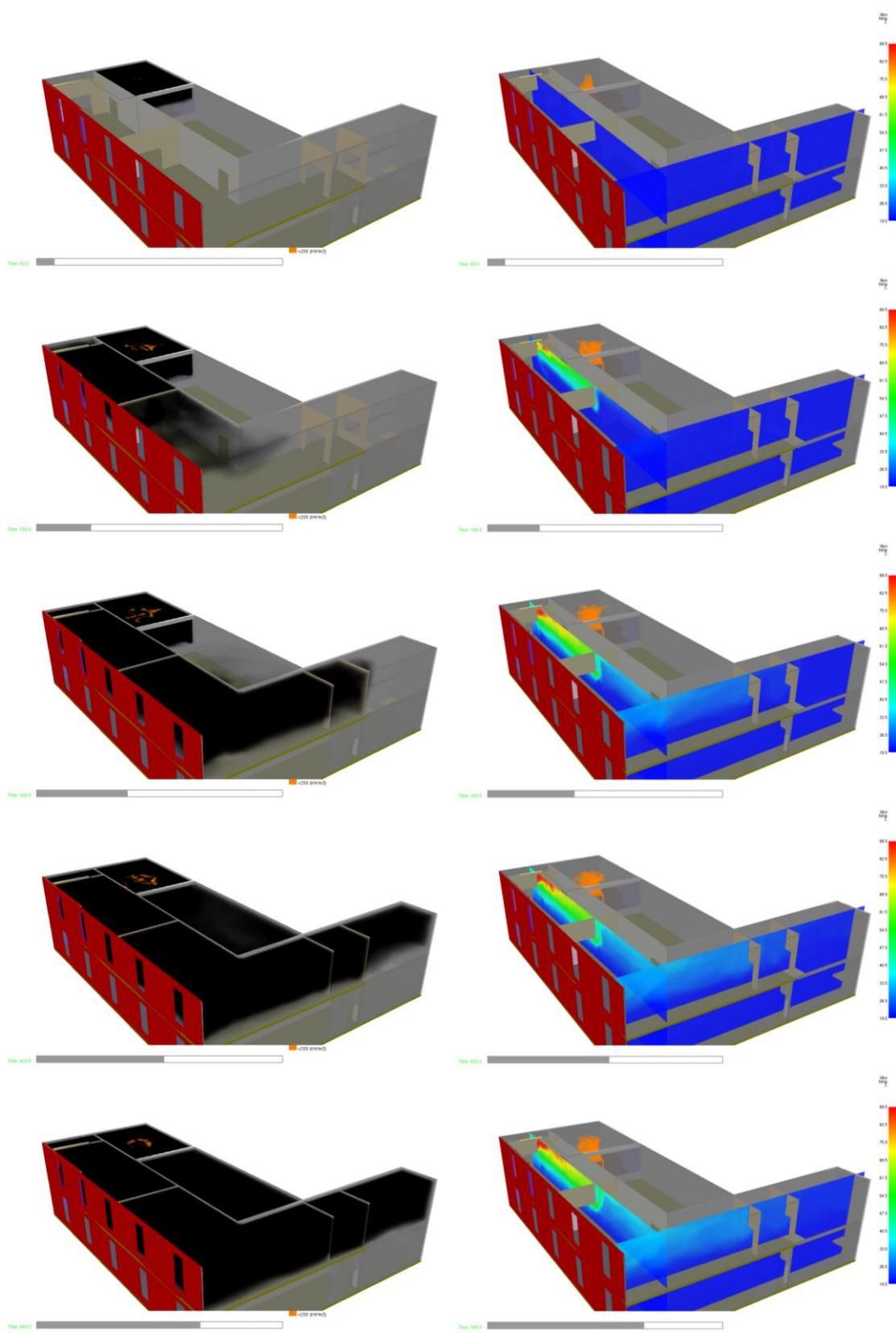


Рис. 40. Визуализация распространения дыма (слева) и горячих газов (справа) при пожаре. Сверху вниз: 1, 3, 5, 7 и 9 мин от начала горения. Сценарий № 1

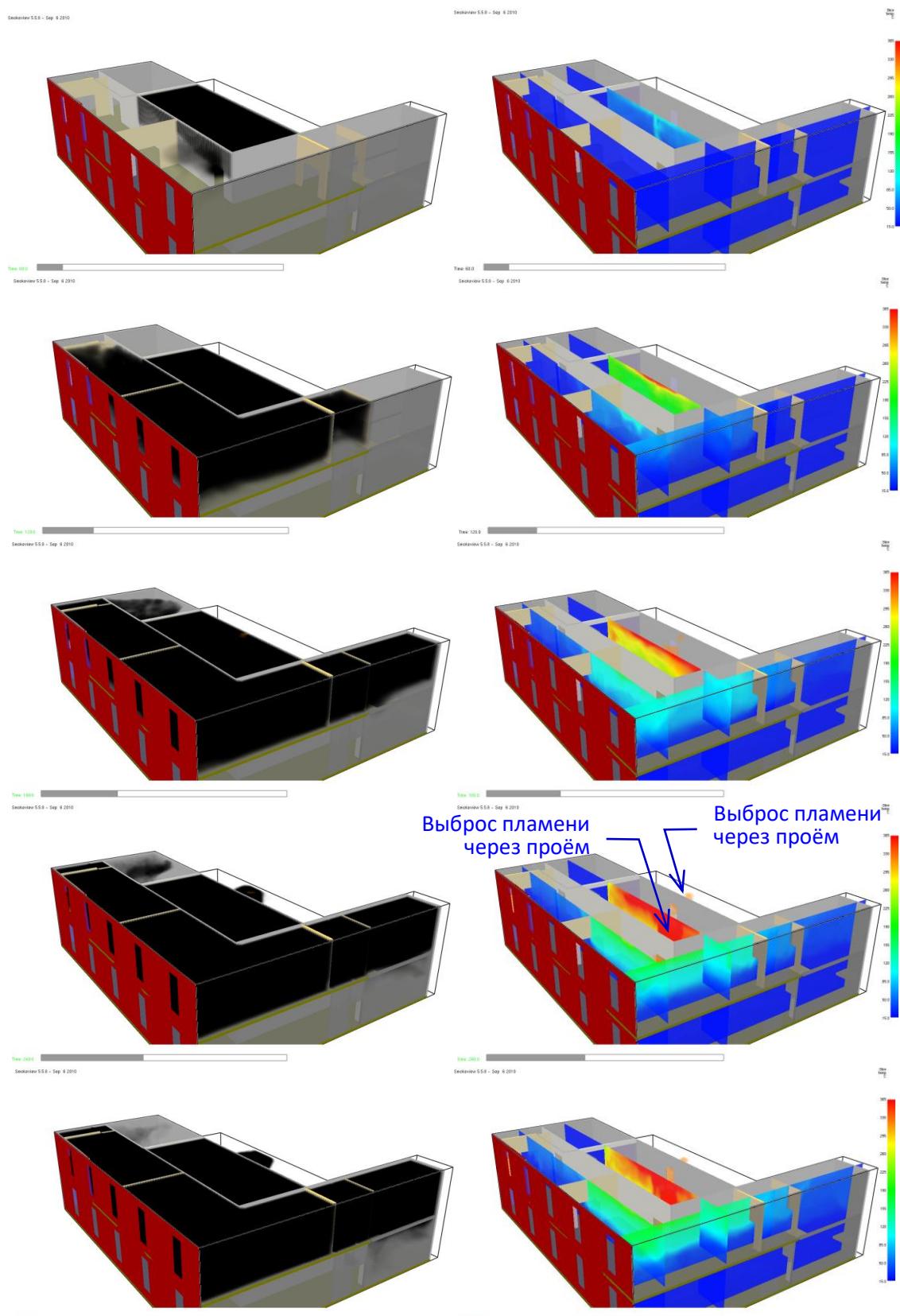


Рис. 41. Визуализация распространения дыма (слева) и горячих газов (справа) при пожаре. Сверху вниз: 1, 2, 3, 4 и 5 мин от начала горения. Сценарий № 2

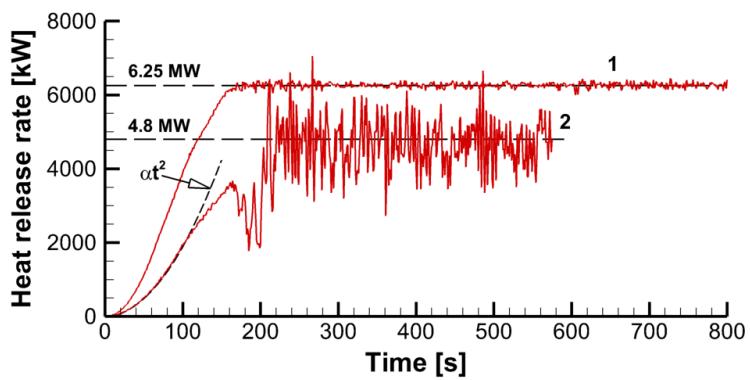


Рис. 42. Зависимость мощности тепловыделения от времени для двух сценариев пожара

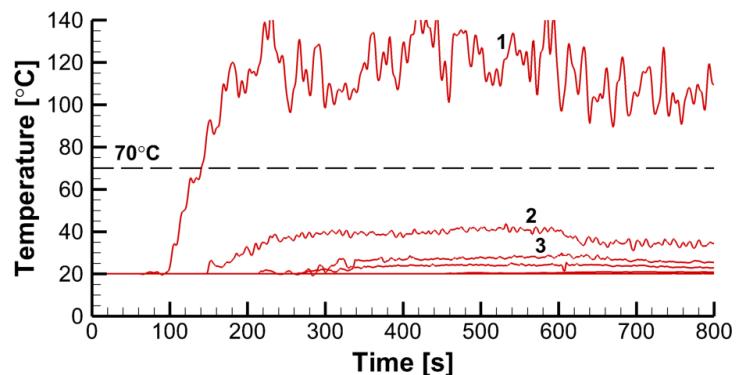


Рис. 43. Рост температуры в контрольных точках 1, 2, 3 и др. на высоте 1.7 м над уровнем пола. Показан критический уровень 70 °C. Сценарий № 1

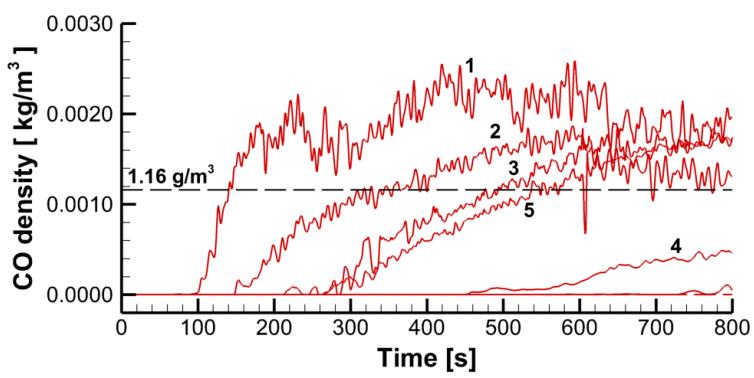


Рис. 44. Рост парциальной плотности CO в контрольных точках 1-5 и др. на высоте 1.7 м над уровнем пола. Показан критический уровень 1.16 г/м³. Сценарий № 1

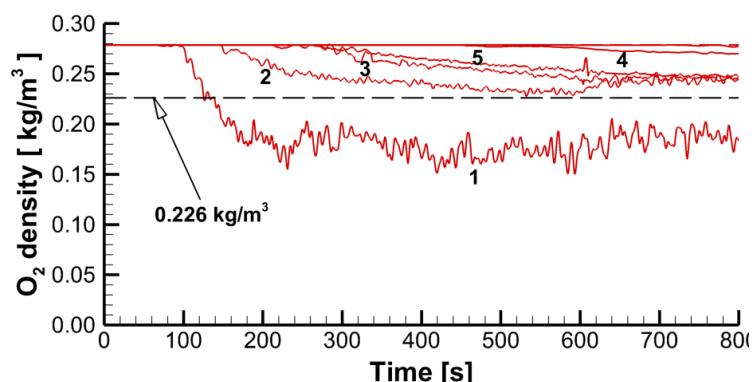


Рис. 45. Снижение парциальной плотности O₂ в контрольных точках 1-5 и др. на высоте 1.7 м над уровнем пола. Показан критический уровень 0.226 кг/м³. Сценарий № 1

Таблица 28

**Расчётная длительность временного промежутка  
от начала горения до достижения предельных значений для сценария № 1**

Номер контрольной точки <sup>22</sup>	Температура 70 °C	Длительность временного промежутка от начала горения до достижения предельных значений, с			
		Парциальная плотность CO 1,16 г/м³	Парциальная плотность CO₂ 0,111 кг/м³	Парциальная плотность кислорода 0,226 кг/м³	Дальность видимости 20 м
1	145/-	150/180	-	150/-	100/125
2	-	320/210	-	-	150/130
3	-/80	480/80	-/-	-/80	210/40
4	-/80	540/80	-/-	-/80	270/50
5	-/300	-/145	-/-	-/180	450-480 <sup>23</sup> /120
6	-/-	-/-	-/-	-/-	740-780/280-320
7	-/-	-/-	-/-	-/-	-/420-540

Можно также отметить очень низкую концентрацию кислорода в контрольных точках 3, 4 и 5, которая свидетельствует о том, что в данном сценарии горение протекает в режиме, регулируемом вентиляцией. Моменты времени, когда впервые достигаются предельные значения температуры, концентраций продуктов сгорания и кислорода, а также дальности видимости, приведены в табл. 28 значениями справа от дробной черты.

<sup>22</sup> В контрольных точках 7-10 предельные значения ОФП за время расчёта не достигаются.

<sup>23</sup> Первое значение соответствует несветящимся знакам, второе – светящимся.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### **Нормативные документы**

1. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Федеральный закон № 123-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России № 382 от 30.06.2009.
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Приложение к приказу МЧС России № 404 от 10.07.2009.
4. NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting / NFPA, 2018.

### **Издания на русском языке**

5. ТР-5044 Пожарная нагрузка. Обзор зарубежных источников / под ред. В.Ю. Грачева В.Ю. – Екатеринбург: ООО «СИТИС», 2009 г. – 82 с.
6. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача: Учебник / М.: «Энергия», 1975. – 483 с.
7. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / М.: «Высшая школа», 1967. – 600 с.
8. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожаров. Учебное пособие / М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
9. Кузнецов Е.А. Численное моделирование воспламенения и горения полимерных и композитных материалов при испытаниях на пожароопасность: дис. канд. техн. наук. по спец. 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника». – СПб.: СПбПУ, 2020. – 217 с.
10. Маркус, Е.С., Снегирёв, А.Ю., Кузнецов, Е.А., Танклевский, Л.Т., Аракчеев, А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28 № 4. – С. 29-41.
11. Маркус, Е.С. Распространение турбулентного естественно-конвективного пламени по поверхности твёрдых горючих материалов: дис. канд. техн. наук. по спец. 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника». – СПб.: СПбПУ, 2020. – 215 с.
12. Пузач, С.В., Казеннов, В.М., Пузач, В.Г. Интегральная модель расчета газообмена помещения с окружающей средой при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 4. – С. 68-72.
13. Снегирёв, А.Ю., Танклевский, Л.Т. Макрокинетика пожара в помещении // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т.36, №5. – С. 761–766.

14. Снегирёв, А.Ю., Талалов, В.А. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение неперемешанных реагентов: учебное пособие / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 212 с.
15. Снегирёв, А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
16. Снегирёв, А.Ю. Основы теории горения: Учебник / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 352 с.
17. Снегирёв, А.Ю., Талалов, В.А., Степанов, В.В. Испарение жидкости и диффузионное горение конденсированных топлив. Учебное пособие / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 218 с.
18. Снегирёв, А.Ю. Тепловое излучение. Основы теории и методы расчёта. Учебное пособие – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. – 178 с.
19. Цой А.С. Режимы и механизмы подавления пламени распыленной водой: дис. канд. техн. наук. по спец. 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника». – СПб.: СПбПУ, 2016. – 177 с.

### **Зарубежные издания**

20. Alvares, N.J., Foote, K.L., Pagni, P.J. Forced Ventilated Enclosure Fires // Combustion Science and Technology. – 1984. – Vol. 39:1-6. – P. 55-81.
21. Babrauskas, V. Heat Release Rates // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. – Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 3-1–3-37.
22. Beyler, C.L. Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. – Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 3-268–3-314.
23. Deal, S., Beyler C. Correlating preflashover room fire temperatures // Journal of Fire Protection Engineering. – 1990. – Vol. 2, Issue 2. – P. 33-48.
24. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / Wiley, 3rd ed., 2011. – 551 P.
25. Foote, K.L., Pagni, P.J., Alvares, N.J. Temperature Correlations for Forced-Ventilated Compartment Fires // Fire Safety Science. – Proceedings of the 1st International Symposium, IAFSS. – 1986. – P. 139–148.
26. Grosshandler, W. RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment // NIST Technical Note 1402, National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, Maryland, 1993. – P. 164.
27. He, Y., Jamieson, C., Jeary, A., Wang, J. Effect of Computational Domain on Simulation of Small Compartment Fires // Fire Safety Science. – Proceedings of the 9th International Symposium, IAFSS. – 2008. – P. 1365-13679.

28. Heskestad, G. Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. – Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 2-1–2-17.
29. Jin, T. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. – Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 2-42 – 2-53.
30. Karlsson, B., Quintiere J.D., Enclosure Fire Dynamics / CRC Pres., 2000. – 316 P.
31. Kawagoe, K. Fire Behaviour in Rooms // Report No. 27, Building Research Institute. – Tokyo, 1958.
32. Kim, H.-J., Lilley, D.G. Heat Release Rates of Burning Items in Fires // AIAA 2000-0722, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 2000. – P. 27.
33. Koyle, U.O., Faeth, G.M. Carbon Monoxide and Soot Emissions from Liquid-Fueled Buoyant Turbulent Diffusion Flames // Combustion and Flame. – 1991. – Vol. 87. – P. 61-76.
34. Markus, E., Snegirev, A., Kuznetsov, E., Tanklevskiy, L. Application of a simplified pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // Fire Safety Journal. – 2019. – V. 108. – P. 102825.
35. McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., Harkleroad, M.F. Estimating Room Fire Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations // Fire Technology, 1981. – Vol. 17, No. 2. – P. 98-119.
36. McCaffrey, B.J. Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results // NBSIR 79-1910, 1979. – 56 P.
37. Merci, B., Beji, T. Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures / CRC Press, 2016. – 361 P.
38. Mudan, K.S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires // Progress in Energy and Combustion. – 1984. – Vol. 10. – P. 59-80.
39. Mulholland, G.W., Croarkin, C. Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smokes // Fire and materials. – 2000. – Vol. 24, No 5. – P. 227-230.
40. Mulholland, G.W. Smoke Production and Properties //SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. , Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 2-258–2-268.
41. Peatross, M.J., Beyler C.L. Thermal Environment Prediction in Steel-Bounded Preflashover Compartment Fires // Fire Safety Science. – Proceedings of the 4th International Symposium, IAFSS. – 1994. – P. 205-216.
42. Quintiere, J.G. Principles of Fire Behaviour / New York: Delmar Publishers, 1997. – 258 P.
43. Quintiere J.G. Fundamentals of Fire Phenomena / Wiley, 2006. – 439 P.

44. Snegirev, A., Kuznetsov, E., Markus, E. Coupled analytical approach to predict piloted flaming ignition of non-charring polymers // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 93. – P. 74-83.
45. Snegirev, A., Markus, E., Kuznetsov, E., Harris, J., Wu, T. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames // Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 54, No 8. – P. 2275-2293.
46. Steckler, K.D., Quintiere, J.G., Rinkinen, W.J. Flow Induced by Fire in a Compartment // Report NBSTR 82-2520, 1982. – 104 P., <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir82-2520.pdf>.
47. Tewarson, A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 3-82–3-161.
48. Walton, W.D., Thomas, P.H. Estimating Temperatures in Compartment Fires // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., Quincy MA: NFPA, 2002. – P. 3-171–3-188.
49. Wong, W.C.-K., Dembsey, N.A., Alston, J., Lautenberger, C. A multi-component dataset framework for validation of CFD flame spread models // Journal of Fire Protection Engineering. – 2013. – Vol. 23, № 2. – P. 85-134.
50. Zhao, G., Beji, T., Merci, B. Application of FDS to Under-Ventilated Enclosure Fires with External Flaming // Fire Technology – 2016. – V. 52. – P. 2117–2142.
51. Zukoski, E.E. Properties of Fire Plumes // Combustion Fundamentals of Fire, ed. by G. Cox. – London: Academic Press, 1995. – P. 101–219.

### **Документация FDS и Smokeview**

52. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model, 6 ed. // NIST Special Publication 1018-1. – 2020. – 181 P.
53. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification. 6 ed. // NIST Special Publication 1018-2– 2020. – 250 P.
54. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation. 6 ed. // NIST Special Publication 1018-3– 2020. – 1005 P.
55. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6 ed. // NIST Special Publication 1019. – 2020. – 378 P.
56. Forney, G.P. Smokeview, a Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Volume I: User's Guide // NIST Special Publication 1017-1. – 2020. – 215 P.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ FDS<sup>24</sup>

Fire Dynamics Simulator (FDS) – компьютерная программа с открытым кодом [52-55], реализующая полевую модель развития пожара в помещениях и в открытом пространстве. Код FDS написан на языке программирования Fortran. FDS позволяет выполнить расчет диффузионного газофазного пламени, сложного, в том числе сопряжённого, теплообмена с учетом теплового излучения, теплопроводности в конструкциях, а также прогрева и пиролиза твердых горючих материалов и испарения горючих жидкостей. FDS позволяет определить время активации систем обнаружения и тушения пожара, выполнить расчёт пожаротушения распыленной водой и обладает функционалом для имитации работы систем вентилирования. Ниже приводится описание тех компонентов модели, которые используются в данном издании.

#### П1.1. Модель газовой фазы

В основе FDS лежит численное решение уравнений Навье-Стокса в приближениях малых чисел Маха ( $Ma < 0.3$ ) для многокомпонентной реагирующей среды. В состав модели входят следующие уравнения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = m_d''', \quad (87)$$

где  $m_d'''$  – источник массы за счет испарения капель или газификации дисперсных частиц.

Уравнения переноса компонентов смеси:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \mathcal{D}_\alpha \frac{\partial \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} \right) + m_\alpha''' + m_{d,\alpha}''', \quad (88)$$

где  $\tilde{Z}_\alpha$  – массовые доли обобщенных компонентов (горючее, воздух, продукты),

---

<sup>24</sup> В данном разделе использованы материалы работы [11], соответствующие версиям FDS 6.\*. Обновление FDS сопровождается изменением компонентов модели и применяемых алгоритмов. Обозначения, принятые в данном пособии, могут отличаться от использованных в документации FDS.

$m'''$  и  $m''_{d,\alpha}$  – объемная скорость изменения концентрации обобщенных компонентов при горении и в результате испарения капель. Коэффициенты  $\mathcal{D}_\alpha$  включают бинарные коэффициенты молекулярной диффузии и коэффициенты турбулентной диффузии, вычисляемые с помощью равенств  $\lambda_{sgs}/c_p = \mu_{sgs}/\text{Pr}_t$  и  $\rho\mathcal{D}_{sgs} = \mu_{sgs}/\text{Sc}_t$ , где  $\text{Pr}_t$  и  $\text{Sc}_t$  – турбулентные числа Прандтля и Шмидта (попадаются постоянными и равными 0.5).

Уравнения переноса импульса:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{P} + \frac{2}{3} \tau_{k,k}^{sgs} \right) + \frac{\partial \bar{\tau}_{i,j}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{i,j}^{sgs}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \bar{m}_d''' \tilde{u}_i, \quad (89)$$

где  $\bar{P}$  – полное давление,  $\bar{\tau}_{i,j}$  и  $\tau_{i,j}^{sgs}$  – компоненты тензоров разрешённых и подсеточных касательных напряжений,  $g_i$  – компоненты вектора ускорения свободного падения,  $f_{d,i}$  – межфазный обмен импульсом.

Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_T}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_T}{\partial x_j} = \frac{d\bar{P}}{dt} - \frac{\partial q_j''}{\partial x_j} + q''' + q_d''', \quad (90)$$

где  $\tilde{h}_T$  – тепловая энталпия смеси,  $q'''$  – мощность тепловыделения при горении,  $q_d'''$  – теплообмен с каплями,  $q_j''$  – тепловые потоки, обусловленные теплопроводностью, диффузией и тепловым излучением. Коэффициенты молекулярного переноса зависят от температуры. Они вычисляются с помощью кинетической теории. В заданиях, содержащихся в данном пособии,  $m_d''' = 0$ ,  $m_{d,\alpha}''' = 0$  и  $q_d''' = 0$ .

Уравнения (87)-(90) записаны для отфильтрованных величин (осреднение по Фавру), вычисляемых в расчётах турбулентных течений методом крупных вихрей.

Для дискретизации уравнений переноса в газовой фазе используется декартова сетка. Скалярные величины определяются в центрах ячеек, а векторные – на гранях. Аппроксимация производных по пространству выполняется с использованием схемы второго порядка точности. Для перехода на следующий шаг по времени используется схема предиктор-корректор, что обеспечивает

второй порядок точности. На шаге предиктора конвективные слагаемые аппроксимируются противопоточной схемой, а на шаге корректора – схема вниз по потоку.

Появление численных осцилляций подавляется с помощью ограничителя конвективных потоков в уравнениях переноса. В FDS применяется процедура уменьшения полной вариации (Total Variation Diminishing, TVD). По умолчанию, в расчетах методом крупных вихрей используется ограничитель Superbee [52].

### П1.1.1. Моделирование турбулентного течения

Для определения тензора напряжений на подсеточном уровне используется концепция подсеточной вязкости. Полагается, что разрешенный тензор скорости сдвиговой деформации поля скорости линейно связан с анизотропной частью тензора напряжений:

$$\bar{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^{sgs} - \frac{1}{3}\tau_{k,k}^{sgs}\delta_{i,j} = -2(\mu + \mu_{sgs})\left(\tilde{S}_{i,j} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k}\right), \quad (91)$$

где  $\tilde{S}_{i,j}$  – разрешенные на сетке компоненты тензора скоростей сдвиговых деформаций:

$$\tilde{S}_{i,j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right). \quad (92)$$

В текущей версии FDS подсеточная вязкость по умолчанию определяется следующим образом:

$$\mu_{sgs} = \rho C_v \Delta \sqrt{k_{sgs}}, \quad (93)$$

где

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \tilde{u}_i - \hat{\tilde{u}}_i \right)^2, \quad (94)$$

$\tilde{u}_i$  – скорость, разрешаемая на сетке,  $\hat{\tilde{u}}_i$  – скорость, определяемая на расширенном сеточном шаблоне,  $C_v = 0.1$ . Кроме того, имеется возможность активации подсеточной модели Смагоринского (с постоянными и переменными коэффициентами) и другие модели [52].

Касательное напряжение на твёрдой поверхности определяется с помощью классического метода пристеночных функций с линейным и логарифмическим профилем скорости в вязком подслое и за его пределами:  $\tau_w = \rho u_\tau^2$ , где  $\tilde{u}/u_\tau = \min\left(y^+, (\ln y^+)/\kappa + B\right)$ ,  $y^+ = yu_\tau/v$ ,  $y$  – расстояние до стенки,  $v$  – кинематическая вязкость,  $\kappa = 0.41$  и  $B = 5.2$ . Подсеточная вязкость в пристеночной области вычисляется с помощью демпфирующего множителя ван Дриста:  $\mu_{SGS} = \rho l_{SGS}^2 \tilde{S}$ , где  $l_{SGS} = C_s \Delta \left(1 - \exp(-y^+/A)\right)$ ,  $\Delta$  – размер сеточной ячейки,  $C_s = 0.2$ ,  $A = 26$ . Кроме того, имеется возможность активации пристеночной модели WALE.

### П1.1.2. Уравнение переноса энталпии

В уравнении переноса энталпии (90)  $\tilde{h}_T$  – тепловая энталпия, которая является частью полной энталпии смеси:

$$\tilde{h} = \sum_{\alpha} h_{f,\alpha}^0 + \underbrace{\sum_{\alpha} \int_{T^0}^{\tilde{T}} c_{P,\alpha}(T) dT}_{\tilde{h}_T}, \quad (95)$$

где  $h_{f,\alpha}^0$  и  $c_{P,\alpha}$  – стандартная энталпия образования и теплоемкость компонента  $\alpha$ . Мощность тепловыделения при горении равна

$$q''' = - \sum_{\alpha} m_{\alpha}''' h_{f,\alpha}^0 \quad (96)$$

Тепловой поток формируется за счёт теплопроводности, диффузии и переноса теплового излучения:

$$q_j'' = \underbrace{-\left(\lambda + \lambda_{sgs}\right) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}}_{\text{Теплопроводность}} + \underbrace{\sum_{\alpha} h_{T,\alpha} \bar{\rho} \mathcal{D}_{\alpha} \frac{\partial \tilde{Z}_{\alpha}}{\partial x_j}}_{\text{Диффузия}} + \underbrace{q_{r,j}''}_{\substack{\text{Тепловое} \\ \text{излучение}}}. \quad (97)$$

Численный алгоритм, реализованный в FDS, существенно отличается от алгоритмов в других гидродинамических кодах. Уравнение переноса энталпии (90) не решается непосредственно для определения поля  $\tilde{h}_T$ , а используется, чтобы вычислить дивергенцию поля скорости. С учётом уравнения неразрывности (87) из уравнения (90) следует, что:

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\tilde{h}_T \bar{\rho}} \left( \frac{d}{dt} \left( \bar{P} - \bar{\rho} \tilde{h}_T \right) - \frac{\partial q_j''}{\partial x_j} + q''' + q_d''' \right). \quad (98)$$

Эта величина играет ключевую роль при определении полей скорости и давления.

### П1.1.3. Поле скорости и давления

Рассмотрим уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + f_{d,i}. \quad (99)$$

Давление  $P$  может быть представлено в виде суммы

$$P = P_* + p, \quad (100)$$

где  $P_*$  – гидростатическое давление в неподвижной среде, которое удовлетворяет уравнению равновесия

$$0 = -\frac{\partial P_*}{\partial x_i} + \rho_0 g_i, \quad (101)$$

и  $p$  – динамическое давление, обусловленное движением газа и равное нулю, если среда неподвижна. Подставляя равенство (100) в (99) и вычитая из него равенство (101), получим:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho - \rho_0) g_i + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + f_{d,i}. \quad (102)$$

В пределе малых скоростей газа (малые числа Маха) динамическое давление  $p$  мало по сравнению с фоновым давлением  $P_0$ , определяемым из уравнения состояния:  $p/P_0 \sim \rho V^2 / (\rho \mathcal{R}T/M) \sim \gamma Ma^2 \ll 1$ , где  $a = \sqrt{\gamma \mathcal{R}T/M}$  – скорость звука,  $\gamma$  – показатель адиабаты. Это значит, что в рассматриваемом пределе плотность газовой смеси можно вычислять подстановкой фонового давления в уравнение состояния:

$$\rho = \frac{P_0 M}{\mathcal{R} T}, \quad (103)$$

где  $M = \left( \sum_\alpha Y_\alpha / M_\alpha \right)^{-1}$  – средняя молекулярная масса смеси. В соответствии с (103) плотность газа есть функция состава и температуры смеси, но не давления. Фоновое давление в негерметичном помещении или в открытом пространстве

практически не изменяется во времени и пространстве и численно равно атмосферному. Данный подход называют *существенно дозвуковым приближением*.

В существенно дозвуковом приближении решение не содержит звуковых и сверхзвуковых волн, а условие устойчивости и точности разностных схем, применяемых при дискретизации уравнений переноса (условие КФЛ), принимает вид:

$$\Delta t \frac{|\bar{\mathbf{u}}|}{\Delta} < 1, \quad (104)$$

не включающий скорость звука. Это существенно ослабляет требования к шагу по времени  $\Delta t$ .

С вычислительной точки зрения использование уравнения состояния в виде (103) означает, что для поля давления  $p$  нет специального уравнения. В связи с этим динамическое давление  $p$  находят из условия выполнения уравнения неразрывности (87), а плотность – из уравнения состояния (103) с учётом температуры, удовлетворяющей уравнению переноса энталпии. Решатель FDS построен так, чтобы обеспечить выполнение равенства (98), которое, в свою очередь, означает выполнение равенства (90). Для этого уравнение движения (102) записывается в виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + F_i + \frac{\partial H}{\partial x_i} = 0, \quad (105)$$

где  $F_i$  – компоненты вектора

$$\vec{\mathbf{F}} = -\bar{\mathbf{u}} \times \vec{\boldsymbol{\omega}} - p \nabla \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho} \left( (\rho - \rho_0) \vec{\mathbf{g}} + \vec{\mathbf{f}}_d + \nabla \bar{\tau} \right), \quad (106)$$

$\vec{\boldsymbol{\omega}} = \nabla \times \tilde{\bar{\mathbf{u}}}$  – вектор завихренности,  $H$  – модифицированное давление

$$H = \frac{\bar{\mathbf{u}}^2}{2} + \frac{p}{\rho}. \quad (107)$$

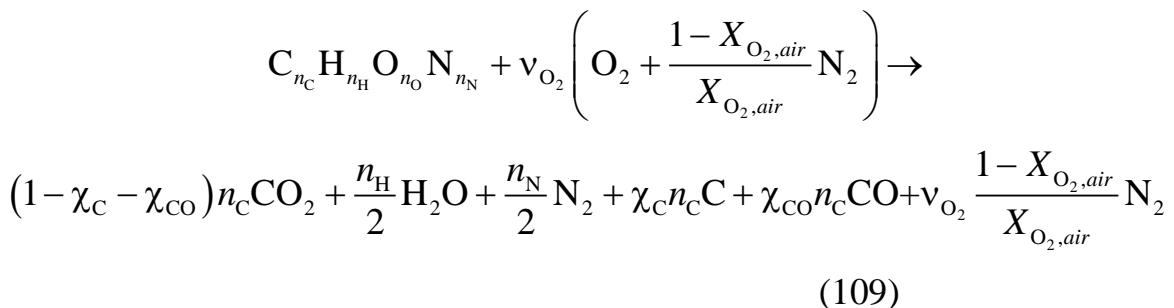
К уравнению (105) применяется оператор дивергенции, в результате чего получается уравнение Пуассона для поля  $H$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x_j \partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial F_j}{\partial x_j}, \quad (108)$$

где дивергенция поля скорости  $\partial u_j / \partial x_j$  определяется равенством (98). Система уравнений, полученная при дискретизации уравнения (108) решается численно методом быстрого преобразования Фурье. Благодаря тому, что данный метод является безытерационным, достигается скорость вычислений, которая значительно превышает скорость работы других гидродинамических кодов. Плотность вычисляется по уравнению неразрывности, а температура по уравнению состояния.

#### П1.1.4. Модель турбулентного горения

В модели турбулентного горения рассматривается глобальная одностадийная и необратимая реакция окисления горючего:



где  $X_{\text{O}_2, \text{air}}$  – объемная доля кислорода в воздухе,

$$v_{\text{O}_2} = n_{\text{C}} \left( 1 - \chi_{\text{C}} - \frac{1}{2} \chi_{\text{CO}} \right) + \frac{n_{\text{H}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2}, \quad (110)$$

$\chi_{\text{C}}$  и  $\chi_{\text{CO}}$  – доля атомов углерода, которая переходит в сажу и моноксид углерода в продуктах. В исходных данных пользователь задает выход сажи ( $y_{\text{C}} = \chi_{\text{C}} M_{\text{C}} / M_{\text{fuel}}$ , параметр SOOT\_YIELD) и CO ( $y_{\text{CO}} = \chi_{\text{CO}} M_{\text{CO}} / M_{\text{fuel}}$ , параметр CO\_YIELD) в кг на кг горючего.

Чтобы ускорить алгоритм расчета, уравнение переноса решается не для каждого компонента отдельно, а только для трех обобщенных компонентов (lumped species): реагентов, воздуха и продуктов. Стехиометрическое уравнение реакции (109) записывается в виде:



Для каждого обобщенного компонента решается отфильтрованное уравнение переноса (88), после чего массовые доли отдельных компонентов  $\tilde{Y}_\alpha$  получаются из массовых долей обобщенных компонентов с помощью матрицы

массовых долей  $\mathbf{A}$ :

$$\begin{pmatrix} \tilde{Y}_{fuel} \\ \tilde{Y}_{O_2} \\ \tilde{Y}_{N_2} \\ \tilde{Y}_{CO_2} \\ \tilde{Y}_{H_2O} \\ \tilde{Y}_C \\ \tilde{Y}_{CO} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \tilde{Z}_{Fuel} \\ \tilde{Z}_{Air} \\ \tilde{Z}_{Products} \end{pmatrix}. \quad (112)$$

Компоненты матрицы  $\mathbf{A}$  вычисляются с учетом стехиометрических коэффициентов уравнения (109).

Скорость расходования или образования компонентов смеси  $m''_\alpha$  вычисляется с помощью модели турбулентного горения, необходимость в которой возникает из-за невозможности пространственного разрешения внутренней структуры фрагментов турбулентного пламени. В результате оказывается, что известны не актуальные, а отфильтрованные и разрешенные на сетке значения температуры и концентрации реагентов. Это не позволяет применять кинетические выражения для скорости химической реакции.

В качестве модели турбулентного горения в FDS применяется модель диссипации вихрей, согласно которой время расходования реагентов определяется временем подсеточного перемешивания, в то время как скорость химической реакции окисления горючего полагается бесконечно большой:

$$m''_{Fuel} = -\rho \frac{\min(\tilde{Z}_{Fuel}, \tilde{Z}_{Air}/\sigma_{air})}{\tau_{mix}}, \quad (113)$$

где  $\tilde{Z}_{Fuel}$  и  $\tilde{Z}_{Air}$  – массовые доли обобщённых компонентов *Fuel* и *Air*,  $\sigma_{air}$  – массовый стехиометрический коэффициент компонента *Air* в уравнении (111).

Подсеточное время смешения  $\tau_{mix}$  вычисляется с учётом временных масштабов, характерных для диффузии, турбулентного перемешивания и естественной конвекции:

$$\tau_{mix} = \max \left( 10^{-4}, \min \left( \frac{\Delta^2}{\mathcal{D} + \mathcal{D}_{sgs}}, 0.4 \frac{\Delta}{\sqrt{(2/3)k_{sgs}}}, \sqrt{2 \frac{\Delta}{g}}, 1 \right) \right), \quad (114)$$

где для обеспечения устойчивых вычислений введены ограничители снизу и сверху.

Мощность тепловыделения определяется с помощью равенства (96).

### П1.1.5. Моделирование теплового излучения

Динамика и структура пламени в значительной степени определяется лу-чистым теплопереносом. При крупномасштабном пожаре на долю теплового излучения приходится до 30-40% всей выделяемой мощности, что определяет значительное тепловое воздействие пламени даже на отдаленные объекты. Модель теплового излучения применяется для расчёта компонентов  $q''_{r,j}$  радиационного теплового потока  $\vec{q}''_r$  в уравнении (97).

В общем виде уравнение переноса теплового излучения записывается относительно спектральной интенсивности теплового излучения [52]:

$$\vec{s} \nabla I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \underbrace{\kappa_\lambda(\vec{r}) I_{b,\lambda}(\vec{r})}_{\text{Эмиссия}} - \underbrace{\kappa_\lambda(\vec{r}) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})}_{\text{Поглощение}} \\ - \underbrace{\sigma_\lambda(\vec{r}) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})}_{\text{Рассеяние}} + \underbrace{\frac{\sigma_\lambda(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\vec{s}, \vec{s}') I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') d\vec{s}'}_{\text{Рассеянное излучение из других направлений}}, \quad (115)$$

где  $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$  – спектральная интенсивность излучения при длине волны  $\lambda$ ,  $\vec{s}$  – вектор направления распространения излучения,  $\kappa_\lambda(\vec{r})$  и  $\sigma_\lambda(\vec{r})$  – локальные коэффициенты поглощения и рассеяния,  $I_{b,\lambda}(\vec{r})$  – эмиссия собственного излучения чёрного тела (функция Планка),  $\Phi(\vec{s}, \vec{s}')$  – индикаторика рассеяния из направления  $\vec{s}'$  в направлении  $\vec{s}$ .

Уравнение (115) упрощается, если пренебречь рассеянием излучения<sup>25</sup>:

$$\vec{s} \nabla I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \kappa_\lambda(\vec{r}) (I_{b,\lambda}(\vec{r}) - I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})). \quad (116)$$

Зависимость коэффициентов поглощения газов от длины волны является очень сложной. Она отличается тем, что существует несколько участков спектра, в которых коэффициенты поглощения существенно отличаются от нуля, в

---

<sup>25</sup> Рассеяние на частицах сажи мало, так как размер частиц меньше длины волны излучения.

то время как между этими участками газы не испускают и не поглощают тепловое излучение. В связи с этим в FDS спектр делится на полосы, для каждой из которых записывается отдельное уравнение переноса:

$$\vec{s} \nabla I_n(\vec{r}, \vec{s}) = \kappa_n(\vec{r})(I_{b,n}(\vec{r}) - I_n(\vec{r}, \vec{s})), \quad (117)$$

где  $I_n(\vec{r}, \vec{s})$ ,  $\kappa_n$  и  $I_{b,n}(\vec{r}) = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})\sigma T^4/\pi$  – интенсивность, эффективный коэффициент поглощения и эмиссия излучения, соответствующие полосе  $n$ ,  $F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$  – доля интенсивности излучения абсолютно чёрного тела в полосе  $n$ . Полная интенсивность вычисляется суммированием по всем полосам:

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_n I_n(\vec{r}, \vec{s}). \quad (118)$$

Данный подход в FDS называется моделью широкой полосы. Обычно в FDS задается 6 или 9 полос с соответствующим числом коэффициентов поглощения, осредненным по выделенным спектральным полосам. Численное значение этих коэффициентов табулированы как функции температуры и концентрации компонентов и рассчитаны с использованием узкополосной модели RadCal [26]. Вычислительные затраты растут пропорционально числу полос.

Несмотря на селективность излучения газообразных продуктов сгорания, наличие сажи сглаживает спектр, характерный для смеси. Если вклад сажи в тепловое излучение доминирует, то можно использовать так называемое «серое» приближение, что эквивалентно заданию только одной полосы. В рамках серого приближения эффективный коэффициент поглощения не зависит от длины волны, но зависит от температуры и состава смеси. Наибольшая ошибка такого приближения имеет место, если основным является вклад газообразных продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Расчёт эмиссии излучения использует важное допущение об известной и наперёд заданной доле мощности тепловыделения, соответствующей эмиссии теплового излучения. Эмиссия излучения определяется по формуле:

$$\kappa I_b = C \frac{\kappa \sigma \tilde{T}^4}{\pi}, \quad (119)$$

где  $C$  – корректирующий коэффициент, вычисляемый так, чтобы приблизённо обеспечить требуемое значение доли излучённой энергии  $f_r$ . В тех ячейках сетки, где протекает горение (критерием является выполнение неравенства  $f_r q'' > 10 \text{ кВт}/\text{м}^3$ ), коэффициент  $C$  вычисляется следующим образом:

$$C = \min \left( 100, \max \left( 1, \frac{\sum_{q''>0} (f_r q'' + \kappa G) \Delta V}{\sum_{q''>0} 4\kappa\sigma \tilde{T}^4 \Delta V} \right) \right), \quad (120)$$

где  $f_r$  – доля излученной энергии,

$$G = \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\vec{s} \quad (121)$$

– интенсивность проходящего излучения со всех направлений. Если  $f_r q'' < 10 \text{ кВт/м}^3$ , то  $C = 1$ . Параметр  $C\_MIN$  в группе **&RADI** позволяет изменить это значение. Значение доли излученной энергии задается в исходных данных на основании результатов экспериментов (табл. 11).

Уравнение переноса излучения (117) решается численно методом контрольных объемов. Для этого выполняется дискретизация телесного угла, как показано на рис. 46. Азимутальный ( $\theta$ ) и полярный ( $\phi$ ) углы разбиваются, соответственно, на  $N_\theta$  и  $N_\phi = N_\phi(\theta)$  направлений так, чтобы  $N_\phi$  было кратно 4. Общее число дискретных направлений,  $N_\Omega = \sum_{i=1}^{N_\theta} N_\phi(\theta_i)$ , задается в исходных данных. Распределение углов основано на эмпирических правилах, обеспечивающих одинаковые дискретные телесные углы  $\delta\Omega^l = 4\pi / N_\Omega$  во всех направлениях.

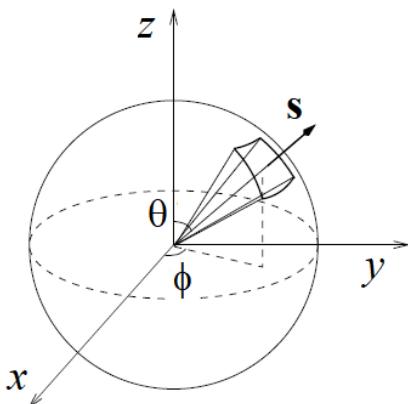


Рис. 46. Система координат, используемая для угловой дискретизации

По умолчанию используется 104 угловых направления. Это число выбрано на основании обширной валидации для крупномасштабных сценариев [52, 53, 55]. Если число дискретных угловых направлений недостаточно, то проявляется так называемый лучевой эффект – сильная угловая неравномерность интенсивности теплового излучения на большом удалении от локализованного источника.

Внутри каждого углового направления уравнение переноса излучения интегрируется по контрольному объему и углу:

$$\int_{\Delta\Omega^l} \int_{\Delta V_{i,j,k}} \vec{s} \nabla I(\vec{r}, \vec{s}) d\vec{r} d\vec{s} = - \int_{\Delta\Omega^l} \int_{\Delta V_{i,j,k}} \kappa_n(\vec{r}) (I(\vec{r}, \vec{s}) - I_b(\vec{r})) d\vec{r} d\vec{s}. \quad (122)$$

Применив к левой части уравнения (122) теорему Остроградского-Гаусса, получим интеграл по поверхности. В предположении равномерного распределения интенсивности излучения в пределах дискретного угла интеграл по поверхности аппроксимируется суммой соответствующих выражений по всем граням ячейки:

$$\sum_{m=1}^6 A_m I_m^l \int_{\Omega^l} (\vec{s}' \cdot \vec{n}_m) d\vec{s}' = \kappa_{ijk} (I_{b,ijk} - I_{ijk}^l) \Delta V_{ijk} \delta\Omega^l, \quad (123)$$

где  $I_{ijk}^l$  – интенсивность излучения в направлении  $l$ ,  $I_m^l$  – интенсивность излучения на  $m$ -й грани ячейки,  $I_{b,ijk}$  – эмиссия излучения чёрного тела,  $\delta\Omega^l$  – дискретный телесный угол, соответствующий направлению  $l$ ,  $V_{ijk}$  – объем ячейки  $ijk$ ,  $A_m$  – площадь  $m$ -й грани ячейки,  $\vec{n}_m$  – единичный вектор нормали к  $m$ -й грани ячейки.

Равенства (122) и (123) записываются для всех спектральных полос и формируют систему линейных алгебраических уравнений относительно  $I_{ijk}^l$ . Для расчета  $I_m^l$ , где  $m$  – грань ячейки, применяется противопоточная схема первого порядка. Быстродействие алгоритма определяется тем, что если в пространстве нет отражающих границ, то решение данной системы уравнений можно получить в один проход явным маршевым методом.

По интенсивности излучения вычисляется вектор лучистого теплового потока:

$$\vec{q}_r'' = \int_{4\pi} \vec{s} I(\vec{r}, \vec{s}) d\vec{s} \quad (124)$$

и его дивергенция

$$\nabla \vec{q}_r'' = \kappa (4\pi I_b - G), \quad (125)$$

где  $G$  – интенсивность проходящего излучения (121). Это значение затем используется в правой части уравнения переноса энталпии (90).

## П1.2. Модель твёрдой фазы

### П1.2.1. Теплопередача в слое твердого материала

Для расчета теплопередачи в слое твердого материала решается одномерное уравнение теплопроводности (полагается, что тепло распространяется по нормали к поверхности):

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + q''_{ch} + q''_r, \quad (126)$$

где  $T_s$  – температура твёрдого материала,  $c_s$ ,  $\rho_s$  и  $\lambda_s$  – его теплоемкость, плотность и теплопроводность. Слагаемые  $q''_{ch}$  и  $q''_r$  характеризуют поглощение тепла в химических реакциях (пиролиз горючих материалов) и поглощение теплового излучения в объёме слоя (если материал прозрачен для теплового излучения).

В граничном условии на нагреваемой поверхности учитываются конвективный  $q''_c$  и лучистый тепловые потоки  $q''_r$ :

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = q''_c + q''_r. \quad (127)$$

Для оценки конвективного теплового потока на поверхности твердого материала в FDS по умолчанию используется приближенная формула:

$$q''_c = \alpha (\tilde{T} - T_w), \quad (128)$$

где  $T_w$  – температура стенки,  $\tilde{T}$  – разрешённая температура в пристеночной ячейке. Коэффициент теплоотдачи вычисляется следующим образом<sup>26</sup>:

$$\alpha = \max \left( \frac{\lambda}{\Delta_n / 2}, \frac{\lambda}{L} \max(1, \text{Nu}) \right), \quad (129)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность газа. Первый аргумент активируется на достаточно мелкой сетке, а второй использует эмпирические корреляции для числа Нуссельта при турбулентной конвекции. В случае естественной конвекции у вертикальной поверхности  $\text{Nu} = 0.13(\text{Gr Pr})^{1/3} = C |\tilde{T} - T_w|^{1/3}$ , где  $C = 1.31 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^{4/3})$ .

---

<sup>26</sup> Аппроксимация конвективного теплового потока, используемая в разных версиях, может отличаться.

В качестве масштаба длины принимается  $L = 1$  м. Если размер приповерхностной ячейки по нормали к поверхности  $\Delta_n$  достаточно мал, то  $\alpha = \lambda / (\Delta_n / 2)$  и

$$q''_w = -\lambda \frac{T_w - \tilde{T}}{\Delta_n / 2}. \quad (130)$$

В качестве альтернативы возможно задание линейного профиля температуры  $T^+ = \text{Pr} y^+$  внутри вязкого подслоя ( $y^+ \leq 11.8$ ) и логарифмического  $T^+ = (\text{Pr}_t \ln y^+) / \kappa + B_t$  за его пределами ( $y^+ > 11.8$ ). Это аналогично расчету касательного напряжения (см. приложение П1.1.1). В приведённых соотношениях  $T^+ = (\tilde{T} - T_w) / T_\tau$  – безразмерная температура в центре приповерхностной ячейки,  $T_\tau = q''_w / (\rho c_p u_\tau)$ ,  $B_t = (3.85 \text{Pr}^{1/3} - 1.3)^2 + 2.12 \ln \text{Pr}$ . Коэффициент теплоотдачи, используемый в формуле (128), принимает вид:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_\tau}{T^+}. \quad (131)$$

Использование линейного профиля температуры при малых значениях  $y^+$  приводит к равенству (130).

Если размер приповерхностных ячеек по нормали к поверхности достаточно мал, то оба способа расчёта коэффициентов теплоотдачи приводят к равенству (130), а конвективный тепловой поток вычисляется с учётом температурного градиента, разрешаемого на сетке. На крупных сетках тепловой поток моделируется с помощью эмпирических формул (129) или логарифмического профиля для  $T^+$  в равенстве (131).

Отметим, что в работах [9, 11] сформулирована, апробирована и внедрена в FDS новая подсеточная модель для расчета конвективного теплового потока при недостаточном сеточном разрешении температурных градиентов и наличии диффузационного пламени вблизи поверхности горючего материала.

### П1.2.2. Моделирование пожарной нагрузки

В качестве пожарной нагрузки в FDS рассматриваются твердые горючие материалы или разливы горючих жидкостей. В первом случае применяется одна из двух моделей термического разложения. *Кинетическая* модель вычисляет

скорость образования газообразного горючего в результате реакций термического разложения, скорость протекания которых зависит от температуры, текущей плотности материала и концентрации кислорода. *Тепловая* модель термического разложения пожарной нагрузки опирается на тепловую теорию воспламенения (см. раздел 2.2.3). В расчётах приближенно учитывается возможность формирования твердого углистого остатка. Примеры использования кинетической и тепловой модели пиролиза пожарной нагрузки имеются в работах [10] (E.C. Markus, 2019), [11] (E.C. Markus и др., 2020), [34] (E.S. Markus et al., 2019).

Скорость испарения жидкости вычисляется с учетом стефановского потока в рамках классической теории.

Перечисленные подходы учитывают обратную связь между тепловыделением в газовой фазе и скоростью газификации пожарной нагрузки. В FDS допускается задание скорости выгорания пожарной нагрузки (постоянной или зависящей от времени) согласно заданному сценарию в рамках проектного пожара. Именно этот способ моделирования очага пожара наиболее распространён в инженерных расчетах и используется в данном издании.

## **П2. ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ**

Страница проекта FDS на Github. На странице проекта FDS на ресурсе Github можно найти: руководства пользователя, исходный код и скрипты для его компиляции, утилиты для автоматической обработки результатов и считывания CAD-файлов, а также fds-файлы с примерами валидации и верификации кода.

<https://github.com/firemodels/fds>

Кроме того, имеются разделы с инструкциями для желающих внести вклад в развитие FDS и изменения в исходный код.

Официальный форум FDS (Google Discussion Group site for FDS and Smokeview). Здесь можно задать вопросы другим пользователям FDS и напрямую разработчикам.

<https://groups.google.com/g/fds-smv?pli=1>

Калькуляторы для расчета разрешающей способности сетки по параметру, высоты пламени и его температуры на оси в зависимости от мощности тепловыделения и т.д.

<https://www.sbenkorichi.com/calculators/>

Настройка подсветки синтаксиса в fds-файлах. Подсветка синтаксиса доступна для нескольких текстовых редакторов. Инструкции по включению подсветки синтаксиса можно найти в сети Интернет. Ссылки для скачивания программ и файлов с синтаксисом:

- Notepad ++  
[notepad-plus-plus.org](http://notepad-plus-plus.org)  
[github.com/firetools/blenderfds/wiki/Syntax-highlighting-for-Notepad-plus-plus](http://github.com/firetools/blenderfds/wiki/Syntax-highlighting-for-Notepad-plus-plus)
- Sublime Text  
[sublimetext.com](http://sublimetext.com)  
[github.com/firemodels/fds/tree/master/Utilities/Syntax\\_Highlighting](http://github.com/firemodels/fds/tree/master/Utilities/Syntax_Highlighting)
- Vim  
[www.vim.org](http://www.vim.org)  
[github.com/firemodels/fds/tree/master/Utilities/Syntax\\_Highlighting](http://github.com/firemodels/fds/tree/master/Utilities/Syntax_Highlighting)

Расчет эвакуации (FDS+EVAC). FDS можно использовать для расчета эвакуации людей. Соответствующий модуль (EVAC) интегрирован в основной код FDS, является бесплатным и не требует дополнительной установки. Инструкции по работе с модулем EVAC можно найти по ссылке:

[http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+EVAC\\_Guide.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+EVAC_Guide.pdf)

Некоммерческий пакет BlenderFDS. В настоящее время разрабатывается бесплатный пакет, который интегрирует программное обеспечение для 3D-моделирования Blender и FDS. Инструкции по установке BlenderFDS находятся на сайте.

<https://firetools.github.io/blenderfds/>

Полезные видеоуроки по работе с Blender:

<https://www.youtube.com/channel/UCxbGG4FKKTNXZ64BMjGScPQ>

Коммерческие пакеты PyroSim и PathFinder. Компания Thunderhead Engineering создала удобную графическую оболочку для работы с FDS и FDS+EVAC, которая доступна на сайте:

<https://www.thunderheadeng.com/>

Указанное ПО позволяет не только упростить постановку задачи, но и предоставляет возможности по обработке результатов. Для ознакомления с функциями можно скачать пробную версию (на 30 дней). Студенты и преподаватели могут запросить бесплатную академическую лицензию (на полгода с возможностью продления).

<https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-licensing/><sup>27</sup>

Инструкции по работе с данным ПО и полезные уроки:

<https://support.thunderheadeng.com/tutorials/>

Расчет часто используемых величин:

<https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/resources/#tools>

Вideoуроки на русском языке:

<https://pyrosim.ru/polevaya-model-pozhara>

### Образовательные проекты.

- Сайт Международной ассоциации по исследованиям в области пожарной безопасности (International Association for Fire Safety, IAFSS).

<https://iafss.org/>

Помимо новостей сообщества на сайте имеется информация о международных конференциях, открытых вакансиях и несколько образовательных ресурсов. Одним из наиболее ценных для студентов является раздел с учебными материалами (лекциями, презентациями, списком самых используемых формул и др.) от Dr. Björn Karlsson, составленных на основе его учебника для инженеров [30].

<https://iafss.org/resources/educational-resources/enclosure-fire-dynamics/>

- Летняя школа по численному моделированию динамики пожара от Юлихского научного центра в Германии (Summer School on Fire

---

<sup>27</sup> См. раздел Educational Licensing. Каждая заявка рассматривается отдельно.

Dynamics Modeling, Forschungszentrum Jülich (Germany), Institute for Advanced Simulation / Civil Safety Research). Школа проводится бесплатно каждые 2 года. Посвящена теоретическим основам горения, численным методам и практическим занятиям (в основном с использованием FDS). Лекции читают университетские профессора и разработчики FDS. Презентации и материалы 2019 года доступны по ссылке.

[https://www.fz-juelich.de/ias/ias-7/EN/Research/Fire\\_Dynamics/Events/SummerSchool2019/\\_node.html](https://www.fz-juelich.de/ias/ias-7/EN/Research/Fire_Dynamics/Events/SummerSchool2019/_node.html)

- Международная магистерская программа по пожарной безопасности (International Master of Science in Fire Safety Engineering). Каждый семестр студенты обучаются в одном из 6 ведущих университетов в данной области (университеты Гента, Лунда, Эдинбурга, Цюриха, Квинслэнда и Мэриленда). Подробнее об условиях поступления на сайте:

<https://imfse.be/>

- Онлайн-курс «Воздействие пожаров на людей, здания и окружающую среду» (The Effect of Fires on People, Property and the Environment). Подготовлен университетом Мэриленда. Существует бесплатный доступ:

<https://www.coursera.org/learn/fire-effect>

- Электронная версия текста данного учебного пособия, рассматриваемые fds-файлы, примеры расчетов, варианты заданий и другие вспомогательные материалы:

<https://github.com/eksmarkus/fds-textbook-2020>.



*Маркус Екатерина Сергеевна  
Снегирёв Александр Юрьевич  
Кузнецов Егор Александрович*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА С ПОМОЩЬЮ FIRE DYNAMICS SIMULATOR**

**Учебное пособие**

Свод. темпплан 2020 г.

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 — учебная литература

---

Подписано в печать XX.XX.2020. Формат 60Х84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. X,0. Тираж X00. Заказ .

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 550-40-14.  
Тел./факс: (812) 297-57-76.