

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

С.В. Пузач, В.М. Казённов, Р.П. Горностаев, А.Ю. Вараксин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ  
И ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ  
РЕАЛЬНОГО ПОЖАРА

*Допущено Министерством Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве  
учебного пособия для курсантов, студентов и слушателей  
образовательных учреждений МЧС России*

Москва 2006

УДК 614.841  
ББК 38.96  
О-62

**Рецензенты:**

Академик РАИН, доктор технических наук профессор НИЦ  
«Экологически чистые промышленные энерготехнологии» института  
высоких температур РАН *Е.М. Шелков*;  
Кандидат технических наук, доцент начальник кафедры прикладной  
механики Академии ГПС МЧС России *В.Н. Ильин*

**Пузач С.В., Казённов В.М., Горностаев Р.П., Вараксин А.Ю.**

Определение времени эвакуации людей и огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара: Учебное пособие. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. - 114 с.

ISBN

В учебном пособии приведена математическая модель пожара, ее особенности и упрощения. Описано моделирование действий систем пожаротушения, систем механической вентиляции и дымоудаления, использование метода численного решения систем дифференциальных уравнений. Проведен анализ определения необходимого времени эвакуации людей и огнестойкости строительных конструкций, приведены основные положения по расчету и рекомендации его проведению.

Даны примеры использования методики для определения необходимого времени эвакуации людей и огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара.

Может быть полезно для научных и инженерных работников, специализирующихся в области теории тепломассообмена в сложных термогазодинамических условиях, а также для научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей высших образовательных учреждений пожарно-технического профиля.

УДК 614.841  
ББК 38.96

ISBN

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2006

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1. Математическая модель расчета тепломассообмена при пожаре в помещении ..</b>	6
1.1. Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара.....	7
1.2. Структура полевой модели расчета тепломассообмена.....	7
1.3. Основные уравнения полевой модели .....	8
1.4. Уравнения для расчета процесса прогрева строительных конструкций .....	12
1.5. Расчет турбулентного тепломассообмена.....	14
1.6. Моделирование радиационного теплообмена.....	17
1.7. Расчет процесса выгорания горючей нагрузки .....	20
1.8. Моделирование горения .....	20
1.9. Условия однозначности.....	22
<b>2. Моделирование действий систем пожаротушения</b> .....	23
<b>3. Моделирование действий систем механической вентиляции и дымоудаления ...</b>	24
<b>4. Метод численного решения дифференциальных уравнений</b> .....	25
<b>5. Определение необходимого времени эвакуации людей</b> .....	29
5.1. Расчет необходимого времени эвакуации людей по ГОСТ 12.1.004.91 .....	29
5.2. Назначение и область применения метода расчета времени эвакуации людей с учетом параметров реального пожара.....	34
5.3. Общие положения метода расчета .....	35
5.4. Фактическое время эвакуации людей .....	35
5.5. Основные положения по расчету необходимого времени эвакуации .....	39
5.6. Рекомендации по проведению расчета необходимого времени эвакуации людей .	41
<b>6. Определение огнестойкости строительных конструкций</b> .....	42
6.1. Фактические пределы огнестойкости строительных конструкций.....	42
6.2. Назначение и область применения метода расчета огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара.....	59
6.3. Общие положения метода расчета огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара.....	60
6.4. Теоретические основы расчета огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций .....	63
6.5. Основные положения по расчету огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций .....	63
6.6. Рекомендации по проведению расчета огнестойкости строительных конструкций.....	66
<b>Заключение</b> .....	67
<b>Литература</b> .....	68
<b>Приложения</b> .....	70
Приложение 1. Термины и определения.....	70
Приложение 2. Величины критических температур.....	72
Приложение 3. Параметры горючей нагрузки для жилых и нежилых помещений гражданских зданий .....	74
Приложение 4. Теплофизические свойства материалов конструкций .....	78
Приложение 5. Степень черноты поверхностей ряда материалов .....	83
Приложение 6. Примеры выполнения расчетов необходимого времени эвакуации людей .....	85
Приложение 7. Примеры выполнения расчетов огнестойкости строительных конструкций.....	99

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с переходом многих стран мира к гибкому объектно-ориентированному противопожарному нормированию математическое моделирование пожаров становится определяющим звеном при решении различных задач пожарной безопасности. Федеральное законодательство, в частности, закон о техническом регулировании [1] и стандарт пожарной безопасности [2], обеспечивает законодательную базу реализации на практике принципа гибкого нормирования.

Моделирование тепломассообмена при пожаре представляет собой крайне сложную, в полном объеме не решенную проблему [3]. Реальный пожар как неконтролируемое горение является сложным, до конца не изученным, существенно нестационарным и трехмерным теплофизическим процессом, сопровождающимся изменением химического состава и параметров газовой среды помещения. Турбулентный конвективный и лучистый тепломассообмен в очаге горения с химическими реакциями, теплообмен между горячими газами и ограждающими конструкциями помещения и т.д. осложняются тепломассообменом с окружающей средой через проемы и вследствие работы систем механической приточно-вытяжной вентиляции и пожаротушения, что приводит к существенной неоднородности температурных, скоростных и концентрационных полей продуктов горения в объеме помещения (нестационарность и трехмерность задачи).

Сложность решения такой задачи также подтверждает тот факт, что математическое моделирование турбулентного тепломассообмена в сложных термогазодинамических условиях вместе с другими задачами нелинейной физики входит в список, составленный Российской академией наук, тридцати особо важных и интересных проблем физики на ближайшие годы [4].

Для расчета теплоотвода в ограждающие конструкции при применении интегральных и зонных моделей термогазодинамики пожара используются различные эмпирические и полуэмпирические зависимости, в которых определяются средние по поверхности стен, перекрытия и пола (или отдельных зон) плотности суммарных тепловых (лучистых и конвективных) потоков. Однако современные экспериментальные и теоретические исследования пожаров показывают значительную неравномерность теплоотвода в конструкции, т.е. существенную неоднородность температурных полей внутри материала конструкций, которая может быть выявлена в общем случае только с использованием трехмерных полевых моделей термогазодинамики пожара.

При определении требуемого времени эвакуации людей и огнестойкости строительных конструкций вопрос точности и надежности метода расчета тепломассообмена при пожаре является ключевым. Сложность

разработки такого метода заключается в многофакторности и нелинейности задачи.

В действующих нормах пожарной безопасности фактические пределы огнестойкости устанавливаются на основе определения эквивалентной продолжительности пожаров и коэффициента огнестойкости [7] или по экспериментальным данным по поведению конкретной конструкции в условиях «стандартного» пожара [8]. Однако такой подход не учитывает реальные условия пожара на конкретном объекте, такие как, например, реальный термогазодинамический режим пожара, теплофизические и химические свойства находящейся в помещении горючей нагрузки, геометрические размеры помещения, размеры и расположение проемов и т.д.

Особое место отводится задачам обоснования, разработки и оптимизации объемно-планировочных решений зданий и сооружений с учетом обеспечения безопасности людей при эвакуации. В действующих нормах пожарной безопасности требуемое время безопасной эвакуации людей устанавливается на основе определения критической продолжительности пожара.

В данном пособии представлена математическая модель, позволяющая на основании научно-обоснованного прогноза определять необходимое время эвакуации людей и огнестойкость ограждающих конструкций с учетом реальных параметров возникновения, распространения и развития пожара, теплофизических и химических свойств конкретной горючей нагрузки и теплофизических свойств материала строительных конструкций.

# 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

## 1.1. Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара

1.1.1. Пожар в помещении протекает в сложных термогазодинамических условиях при одновременном воздействии ряда возмущающих его течение факторов:

- неизотермичность (отличие температур твердых поверхностей несущих и ограждающих конструкций и газовых потоков);
- сжимаемость (плотность газа не является постоянной величиной);
- градиенты давления;
- вдув на стенке (поступление в помещение продуктов внутренней де-структуризации материала твердых конструкций, испарение воды, содержащейся внутри материала конструкций, тепломассообменная защита кон-струкций);
- излучение;
- протекание химических реакций;
- двухфазность (одновременное сосуществование нескольких фаз – газ + твердые частицы, газ + жидкость, газ + твердые частицы + жидкость);
- шероховатость поверхностей несущих и ограждающих конструкций;
- кривизна поверхности несущих и ограждающих конструкций;
- турбулентность;
- скачки уплотнения;
- переход ламинарного режима течения в турбулентный.

Действие вышеуказанных факторов приводит к существенному отличию закономерностей тепломассообмена от хорошо изученных «стандартных» условий теплообмена [12]: изотермическое безградиентное течение несжимаемого газа вдоль поверхности непроницаемой пластины. Поэтому методы расчета тепломассообмена при пожаре должны учитывать влияние термогазодинамических условий его развития.

1.1.2. К числу основных особенностей тепломассообменных процессов при пожаре относятся следующие [3]:

- наибольшая разница давлений в разных зонах помещения не превышает десятых долей процента от величины среднего давления в помеще-нии при отсутствии взрывов с образующимися ударными волнами;
- скорости потоков газов малы по сравнению со скоростью звука (при отсутствии детонационного горения и ударных волн);
- скорости диффузии газов достаточно велики, т.е. необходимо учиты-вать процессы термодиффузии и турбулентной диффузии.

1.1.3. При разработке полевой математической модели расчета тепло-массообмена при пожаре в помещении принимаются следующие допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины процесса [3]:

- локальное термодинамическое и химическое равновесие существует во всем объеме помещения, что позволяет использовать равновесное уравнение состояния;

- газовая среда является смесью идеальных газов, что дает удовлетворительное приближение в диапазонах температур и давлений, характерных при пожаре;

- химическая реакция горения является одноступенчатой и необратимой;

- диссоциация и ионизация среды при высоких температурах не учитывается;

- локальные скорости и температуры компонентов газовой смеси и твердых (или жидких) частиц одинаковы между собой в каждой точке пространства (односкоростная и однотемпературная модель), т.е. межфазным взаимодействием (температурным скачком и «скольжением» фаз друг относительно друга) пренебрегаем.

При разработке полевой математической модели расчета тепломассообмена при пожаре в помещении пренебрегаем:

- коагуляцией и дроблением частиц дыма;

- взаимным влиянием турбулентности и излучения;

- обратным влиянием горения на скорость выгорания горючего материала, т.е. скорость выгорания горючей нагрузки рассчитывается на основе полуэмпирических зависимостей без учета текущих параметров газовой среды;

- термо- и бародиффузией.

1.1.4. Газовая среда рассматривается как вязкий теплопроводный сжимаемый идеальный газ. Влияние твердых частиц дыма учитывается при определении характеристик радиационного теплопереноса внутри помещения.

## 1.2. Структура полевой модели расчета тепломассообмена

1.2.1. Полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре состоит из системы основных дифференциальных уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии и дополнительных уравнений, необходимых для ее замыкания. Структура полевой модели приведена на рис. 1.1.

1.2.2. Все составные части полевой модели взаимосвязаны друг с другом с помощью общих параметров (обратная связь). Поэтому процесс решения полевой модели носит итерационный характер.

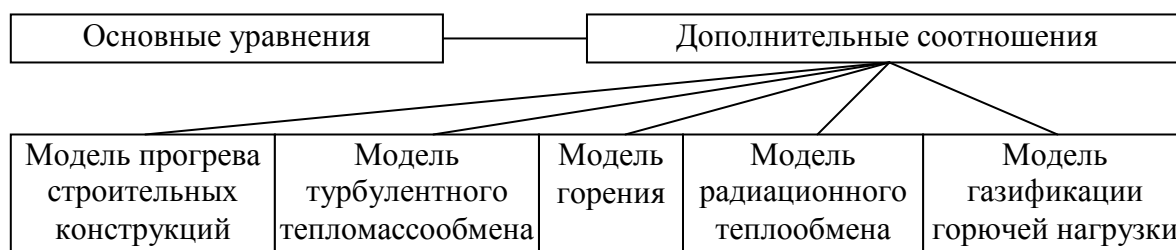


Рис. 1.1. Структура полевой модели

### 1.3. Основные уравнения полевой модели

1.3.1. Полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре основана на уравнениях законов сохранения массы, импульса и энергии. Рассмотрим основные уравнения модели, записанные в ортогональной системе координат. Подробный вывод этих уравнений приведен в работе Л.Г. Лойцянского [13]. Для определенности ось  $x$  направлена вдоль длины, ось  $y$  – ширины и ось  $z$  – высоты помещения. Центр ортогональной системы координат находится в левом нижнем углу помещения (на плане помещения). Размерности всех параметров приведены в системе СИ.

1.3.2. Уравнение неразрывности газовой смеси является математическим выражением закона сохранения массы газовой смеси и имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $x, y, z$  – координатные оси вдоль длины, ширины и высоты помещения соответственно, м;  $w_x, w_y, w_z$  – проекции скорости на соответствующие оси, м/с.

1.3.3. В скалярном виде векторное уравнение закона сохранения импульса для смеси газов распадается на три уравнения движения вдоль координатных осей:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_0)g + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_\tau) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, кг/(м·с);  $\mu_\tau$  – коэффициент турбулентной вязкости, кг/(м·с);  $p$  – давление, Па;  $\rho_0$  – плотность газовой среды за пределами нагретого слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.



Уравнения (1.1)-(1.4) называются уравнениями Рейнольдса и получены из уравнений Навье-Стокса [13] путем осреднения по времени всех параметров.

1.3.4. Уравнение энергии является математическим выражением закона сохранения и превращения энергии. Для тепловых процессов (при рассматриваемых в пункте 1.1.1 данном пособии условиях теплообмена при пожаре) этот закон выражается в виде первого начала термодинамики и имеет следующий вид:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda + \lambda_t + \lambda_r) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\lambda + \lambda_t + \lambda_r) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\lambda + \lambda_t + \lambda_r) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (1.5)$$

где  $T$  – температура, К;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\lambda_t$  – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К);  $\lambda_r$  – коэффициент радиационной теплопроводности, Вт/(м·К);  $q_v$  – интенсивность внутренних источников тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_v = q_{vk} + q_{vl} + q_{vt}$ ;  $q_{vl}$  – интенсивность внутренних источников тепла за счет радиационного (лучистого) теплопереноса, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{vk}$  – интенсивность внутренних источников тепла из-за конвективного теплообмена, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{vt}$  – интенсивность внутренних источников тепла из-за реакций горения, Вт/м<sup>3</sup>.

1.3.5. Закон сохранения массы  $i$ -го газа, входящего в состав смеси, (уравнение неразрывности для компонента газовой смеси) имеет вид:

$$\rho \frac{\partial X_i}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial X_i}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial X_i}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho (D_i + D_t) \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho (D_i + D_t) \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho (D_i + D_t) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + m_i, \quad (1.6)$$

где  $X_i$  – массовая концентрация  $i$ -го газа;  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -го газа, м<sup>2</sup>/с;  $D_t$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $m_i$  – интенсивность внутренних источников (стоков) массы, возникающих из-за образования (исчезновения) молекул данного газа вследствие протекания химических реакций горения, кг/(с·м<sup>3</sup>).

1.3.6. Закон сохранения оптической плотности дыма используется в виде:

$$\frac{\partial D_{on}}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial D_{on}}{\partial x} + w_y \frac{\partial D_{on}}{\partial y} + w_z \frac{\partial D_{on}}{\partial z} = q_D, \quad (1.7)$$

где  $D_{on}$  – оптическая плотность дыма, Нп/м;  $q_D$  – интенсивность внутренних источников оптической плотности дыма, образующегося из-за прохождения реакций горения, Нп/(с·м).

1.3.7. Уравнение состояния смеси идеальных газов имеет вид [27]:

$$p = \rho RT, \quad (1.8)$$

где  $R$  – газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К).

1.3.8. Уравнения теплофизических параметров смеси газов учитывают химический состав смеси. В состав смеси входят следующие газы: кислород, азот, продукты горения (окись углерода, двуокись углерода) и продукты горения горючей нагрузки. Газовая постоянная, плотность и удельная изобарная теплоёмкость смеси газов вычисляются по формулам:

$$\rho = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i; \quad R = \sum_{i=1}^n g_i R_i; \quad c_p = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi}, \quad (1.9)$$

где  $i$  – номер газовой компоненты смеси;  $n$  – число газов в смеси;  $r_i$ ,  $g_i$ ,  $R_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $\rho_i$  – объемная и массовая доля, газовая постоянная (Дж/(кг·К)), удельная изобарная массовая теплоемкость (Дж/(кг·К)) и плотность (кг/м<sup>3</sup>)  $i$ -ой компоненты газовой смеси. Величины удельных изобарных массовых теплоёмкостей компонентов принимаются постоянными или определяются в зависимости от температуры. Соответствующие зависимости описаны в справочной литературе (например, в [14]).

1.3.9. Таким образом, решаются нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения в частных производных законов сохранения массы, импульса и энергии для газовой среды помещения, уравнения сохранения массы для компонентов газовой среды и уравнение оптической плотности дыма. Все дифференциальные уравнения приведены к «стандартному» виду [15], удобному для численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \Phi) + \text{div}(\rho \mathbf{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \Phi) + S, \quad (1.10)$$

где  $\Phi$  – зависимая переменная (энтальпии газовой смеси и материала стен и перекрытия, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации, массовая концентрация и оптическая плотность дыма);  $\Gamma$  – коэффициент диффузии для  $\Phi$ ;  $S$  – источниковый член для  $\Phi$ .

1.3.10. Значения величин в уравнении (1.10) приведены в табл. 1.1. Все величины здесь и далее являются осредненными по времени. При расчете прогрева ограждающих конструкций (уравнения 11 и 12, табл. 1.1):  $w_x = w_y = w_z = 0$ .

Обозначения в табл. 1.1 следующие:  $X_{O_2}$ ,  $X_{CO}$ ,  $X_{CO_2}$ ,  $X_{N_2}$ ,  $X_{H_2O}$ ,  $X_{гр}$  – массовые концентрации кислорода, продуктов горения (окиси углерода и двуокиси углерода), азота, воды и продуктов горения горючей нагрузки;  $D_{O_2}$ ,  $D_{CO}$ ,  $D_{CO_2}$ ,  $D_{N_2}$ ,  $D_{гр}$  – коэффициенты диффузии кислорода, окиси углерода, двуокиси углерода, азота и продуктов горения горючей нагрузки, м<sup>2</sup>/с;  $m_{O_2}$ ,  $m_{CO}$ ,  $m_{CO_2}$  – интенсивность внутренних стоков массы кислорода и

источников массы окиси углерода и двуокиси углерода, возникающих из-за образования (исчезновения) молекул данного газа вследствие протекания химических реакций горения, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $m_{H_2O}$  – интенсивность внутренних источников (стоков) массы воды (водяного пара), возникающих из-за испарения воды (конденсации водяного пара) под влиянием поля температур в помещении и в ограждающих конструкциях, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $\eta$  – полнота сгорания;  $\beta = 1/T$  – коэффициент объемного термического расширения, 1/К;  $L_{O_2}$  – потребление по массе кислорода при сгорании 1 кг горючего материала;  $L_{CO}$ ,  $L_{CO_2}$  – выделение по массе окиси и двуокиси углерода при сгорании 1 кг горючего материала;  $\Psi_\Gamma$  – скорость выгорания горючего материала, кг/с;  $D_{опг}$  – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м<sup>2</sup>/кг;  $i$ ,  $i_w$ ,  $i_c$  – энтальпии газовой смеси, материала стен и перекрытия, Дж/кг;  $Q_p^H$  – низшая рабочая теплота сгорания, Дж/кг;  $\eta$  – полнота сгорания;  $q_D$  – интенсивность внутренних источников оптической плотности дыма, образующегося из-за протекания реакций горения, Нп/(с·м);  $q_{vw}$ ,  $q_{vc}$  – интенсивность внутренних источников теплоты внутри стен и перекрытия, Вт/м<sup>3</sup>;  $\Delta V$  – объем газовой среды, внутри которой находится источник (сток) массы или энергии, м<sup>3</sup>.

Таблица 1.1

Параметры и коэффициенты уравнения (1.10)

№ п/п	Ф	Г	S
1	1	0	0
2	$w_x$	$\mu + \mu_\Gamma$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \operatorname{div} w)$
3	$w_y$	$\mu + \mu_\Gamma$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma \operatorname{div} w)$
4	$w_z$	$\mu + \mu_\Gamma$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma \operatorname{div} w) - \beta g \Delta T$
5	$X_{O_2}$	$(D_{O_2} + D_\Gamma)\rho$	$m_{O_2} = L_{O_2} \Psi_\Gamma \eta / \Delta V$
6	$X_{CO}$	$(D_{CO} + D_\Gamma)\rho$	$m_{CO} = L_{CO} \Psi_\Gamma \eta / \Delta V$
7	$X_{CO_2}$	$(D_{CO_2} + D_\Gamma)\rho$	$m_{CO_2} = L_{CO_2} \Psi_\Gamma \eta / \Delta V$
8	$X_{N_2}$	$(D_{N_2} + D_\Gamma)\rho$	0
9	$X_{H_2O}$	$(D_{H_2O} + D_\Gamma)\rho$	$m_{H_2O} / \Delta V$
10	$X_{пг}$	$(D_{пг} + D_\Gamma)\rho$	$m_{пг} / \Delta V$
11	$D_{опг}$	0	$q_D = D_{опг} \Psi_\Gamma / \Delta V$
12	$i_w$	$\lambda_w$	$q_{vw}$
13	$i_c$	$\lambda_c$	$q_{vc}$
14	$i$	$\lambda + \lambda_\Gamma + \lambda_\Pi$	$\Psi_\Gamma \eta Q_p^H / \Delta V - q_{vp}$

## 1.4. Уравнения для расчета процесса прогрева строительных конструкций

1.4.1. Уравнение теплопроводности является математическим выражением закона сохранения и превращения энергии. Проводится отдельный расчет температурных полей в стенах, полу и перекрытии с использованием нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений теплопроводности в следующем виде [12]:

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) + q_{vw}; \quad (1.11)$$

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + q_{vf}; \quad (1.12)$$

$$\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) + q_{vc}, \quad (1.13)$$

где  $T_w, T_f, T_c$  – локальные температуры материалов стен, пола и перекрытия соответственно, К;  $\rho_w, \rho_f, \rho_c$  – плотности материалов стен, пола и перекрытия, кг/м<sup>3</sup>;  $c_w, c_f, c_c$  – удельные теплоемкости материалов стен, пола и перекрытия, Дж/(кг·К);  $\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c$  – коэффициенты теплопроводности материалов стен, пола и перекрытия, Вт/(м·К);  $q_{vw}, q_{vf}, q_{vc}$  – интенсивность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>.

При отсутствии фазовых переходов внутри материалов конструкций  $q_{vw} = q_{vf} = q_{vc} = 0$ . В случае фазовых превращений методы расчета интенсивности внутренних источников теплоты можно найти в специальной литературе (например, в [23]).

1.4.2. Для колонны с прямоугольной формой поперечного сечения решается уравнение (1.11), в котором величины плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности соответствуют материалу колонны.

В случае с круглой формой поперечного сечения решается уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрической системе координат [12]:

$$\rho_k c_k \frac{\partial T_k}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z_k} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial z_k} \right) + q_{vk}, \quad (1.14)$$

где  $T_k$  – локальная температура материала колонны, К;  $\rho_k, c_k$  и  $\lambda_k$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>), удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) материала колонны;  $r$  – координата вдоль радиуса колонны, м;  $\theta$  – угловая координата, рад;  $z_k$  – координата вдоль высоты колонны, м;  $q_{vk}$  – интенсивность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>.

При отсутствии фазовых переходов внутри материала колонны  $q_{vk} = 0$ .

1.4.3. При произвольной форме сечений строительных конструкций решается уравнение (1.11). При этом необходимо, чтобы координатные оси были согласованы с формой контуров конструкции, и при численном решении дифференциального уравнения необходима генерация ортогональной конечно-разностной сетки.

1.4.4. Начальные условия для уравнений (1.11)-(1.13) принимаются следующие:

- если температура газовой среды внутри помещения равна температуре наружного воздуха, то  $T_{w0} = T_{c0} = T_{f0} = T_a$ ;

- если температуры внутри и снаружи помещения не равны, то распределение температур по толщине конструкций принимается кусочно-линейным (в пределах каждого слоя) от температуры на внутренней поверхности, равной  $T_{m0}$ , до температуры наружной поверхности, равной  $T_a$ , из решения стационарной одномерной задачи теплопроводности через плоскую стенку с граничными условиями первого рода [12].

Здесь  $T_{w0}$ ,  $T_{c0}$ ,  $T_{f0}$  и  $T_{m0}$  – соответственно начальные (перед пожаром) температуры стен, перекрытия, пола и воздуха в помещении.

Начальные условия к уравнению (1.14) имеют вид: температура материала колонны равна начальной температуре воздуха в помещении  $T_{k0} = T_{m0}$ .

1.4.5. Граничные условия для уравнений (1.11)-(1.14) на внутренних поверхностях негорючих конструкций имеют следующий вид (сложные граничные условия [12]):

$$q_1 = q_k + q_l, \quad (1.15)$$

где  $q_1$  – локальная плотность суммарного теплового потока в конструкцию, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_k$  – локальная плотность конвективного теплового потока в конструкцию, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_l$  – локальная плотность лучистого теплового потока в конструкцию, Вт/м<sup>2</sup>.

Локальные плотности лучистых тепловых потоков, поступающих в конструкцию, определяются в соответствии с математической моделью, приведенной в параграфах 1.6.4-1.6.7. данного пособия, локальные плотности конвективных тепловых потоков – в параграфах 1.5.1-1.5.8.

Значения степени черноты внутренней поверхности ряда строительных конструкций приведены в прил. 5.

1.4.6. Граничные условия для уравнений (1.11)-(1.14) на наружных поверхностях негорючих конструкций имеют следующий вид (сложные граничные условия [12]):

$$q_2 = \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_a^4) + \alpha_2 (T_2 - T_a), \quad (1.16)$$

где  $q_2$  – локальная плотность суммарного теплового потока от конструкции к окружающей среде, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_2$  – локальная температура наружной поверхности конструкции, К;  $T_a$  – температура окружающего воздуха, К;  $\varepsilon_2$  –

степень черноты наружной поверхности конструкции;  $\sigma$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\alpha_2$  – локальный коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции на наружных поверхностях конструкции в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Значения степени черноты наружной поверхности ряда строительных конструкций приведены в прил. 5.

Величина локального коэффициента теплоотдачи определяется по формулам свободной конвекции [12] (из зависимостей  $Nu = C(Gr \cdot Pr)^m$ , где  $Nu$  – число Нуссельта;  $Gr$  – число Грасгофа;  $Pr$  – число Прандтля; константы  $C$  и  $m$  определяются в зависимости от расположения поверхности и произведения  $Gr \cdot Pr$ ; торцовые поверхности считаются теплоизолированными).

1.4.7. Сопряжение расчета теплового состояния ограждающих конструкций помещения с полевой математической моделью пожара производится через величину теплового потока, отводимого из помещения в ограждающие конструкции.

1.4.8. В случае многослойных конструкций, когда слои выполнены из различных материалов, предполагается идеальный тепловой контакт на границах между соседними слоями.

1.4.9. Локальные величины плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности материалов отдельных слоев в общем случае зависят от локальной температуры и влажности. Соответствующие значения вышеперечисленных теплофизических параметров находятся в справочной литературе (например, в [16]) и представлены в прил. 4.

1.4.10. Дифференциальные уравнения теплопроводности в частных производных (1.11)-(1.13) могут быть приведены к стандартному виду (1.10) (см. уравнения 12 и 13, табл. 1.1).

1.4.11. Приведенная в данном параграфе математическая модель расчета теплового состояния материалов стен, перекрытия, пола и колонны применима для определения температуры конструкции с сечением любой формы.

## **1.5. Расчет турбулентного теплообмена**

1.5.1. В турбулентных потоках газовой среды при пожаре скорость, давление, температура и другие параметры испытывают беспорядочные колебания (пульсации). Мгновенное распределение всех величин в любой момент времени в помещении с заданными геометрическими параметрами не определяется однозначно только системой исходных уравнений и начальными и граничными условиями, но также существенно зависит от малых случайных возмущений (из-за неустойчивости движения).

Известные модели турбулентности  $k$ - $\varepsilon$ ,  $k$ - $\omega$ , алгебраические и другие [13, 15] показывают, что каждому конкретному случаю течения соответствует вполне определенный набор констант модели. В любой модели турбулентности оговорен круг течений и условий, для которых она справедлива. Особую сложность представляет собой выбор модели при учете сложных граничных условий, зависящих от тепломассообменной защиты стенок конструкций, например, при защите оборудования от теплового воздействия пожара. Константы моделирования еще недостаточно систематизированы для широкого круга даже стационарных безотрывных течений.

Таким образом, математическое моделирование турбулентного конвективного тепломассообмена при пожаре требует тщательного выбора модели турбулентности для конкретных условий пожара.

1.5.2. Наиболее разработанной и часто используемой для расчета тепломассообмена при пожаре является градиентная модель турбулентности –  $k$ - $\varepsilon$  модель [13]. В этой модели предполагается, что коэффициент турбулентной вязкости зависит от кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации в соответствии с формулой Колмогорова [13]:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1.17)$$

где  $\nu$ ,  $\nu_T$  – кинематический коэффициент молекулярной и турбулентной вязкости соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $k = \frac{1}{2}(\overline{w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2})$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $w_x'$ ,  $w_y'$ ,  $w_z'$  – пульсационные составляющие проекций скорости на соответствующие оси,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C_\mu = 0,09$  – эмпирическая константа;  $\varepsilon = \nu \left( \left( \frac{\partial w_x'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_y'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z'}{\partial z} \right)^2 \right)$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ .

1.5.3. Коэффициент молекулярной динамической вязкости газа определяется по величине кинематической молекулярной вязкости, вычисляемой по формуле Сезерленда [12]:

$$\frac{\mu}{\mu_o} = \frac{1 + \frac{C}{T_o}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{T_o}}, \quad (1.18)$$

где  $C$  – эмпирическая константа для конкретного газа,  $\text{К}$ ;  $\mu$  – коэффициент молекулярной динамической вязкости,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;  $\mu_o$  – известная величина динамической вязкости при выбранной температуре  $T_o$ ,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ . Значения величин  $C$  и  $T_o$  приводятся в справочной литературе (например, в [12]).

1.5.4. Для нахождения кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации решаются следующие дифференциальные уравнения законов сохранения соответствующих величин [13]:

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial k}{\partial x} + w_y \frac{\partial k}{\partial y} + w_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_t \left( \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_t} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \varepsilon; \quad (1.19)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + w_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_t \left( \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_t} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (1.20)$$

В стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности набор эмпирических констант является следующим [4]:  $C_1=1,44$ ;  $C_2=1,92$ ;  $\sigma_k=1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon=1,3$ ;  $C_\mu=0,09$ . В области конвективной колонки модель модернизируется:  $C_1=1,6$ .

1.5.5. Для определения коэффициентов турбулентной теплопроводности смеси  $\lambda_t$  (уравнение энергии (1.5)) и турбулентной диффузии компонентов  $D_t$  (уравнения неразрывности для газовых компонентов (1.6)) используется тройная аналогия Прандтля [12]: при равенстве чисел Прандтля и Льюиса единице ( $Pr = Le = 1$ ) и отсутствии градиента давления в потоке газа ( $dp/dx = 0$ ,  $dp/dy = 0$ ,  $dp/dz = 0$ ) уравнения движения (1.2)-(1.4), энергии (1.5) и диффузии (1.6) становятся тождественными и в случае подобия граничных условий существует подобие полей скоростей, температур и концентраций.

Турбулентное и диффузионное числа Прандтля принимаем равными  $Pr_t = Pr_d = 1$ . Тогда коэффициент турбулентной теплопроводности определяется из соотношения:

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}; \quad (1.21)$$

а коэффициент турбулентной диффузии равен:

$$D_t = \mu_t / \rho Pr_d. \quad (1.22)$$

Молекулярная теплопроводность приведена в учебнике «Основы теории теплообмена» [12] (при  $Pr = const$  и слабой зависимости удельной теплоемкости от температуры):

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (1.23)$$

где  $\lambda_0$  – известная величина коэффициента теплопроводности при выбранной температуре  $T_0$ , Вт/(м·К).

1.5.6. Уравнения (1.17)-(1.23) позволяют определить коэффициенты турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии, входящие в уравнения полевой модели (1.2)-(1.6).



1.5.7. Граничные условия для уравнений (1.19) и (1.20) имеют вид:  
 - на твердой негорючей поверхности:

$$\partial k / \partial n = 0; \quad (1.24)$$

$$\varepsilon_{\text{тп}} = \frac{C_{\mu}^{0,75} k_{\text{тп}}^{1,5}}{0,4 n_{\text{тп}}}, \quad (1.25)$$

где  $k_{\text{тп}}$  – величина кинетической энергии турбулентности в ближайшем к поверхности узле конечно-разностной сетки,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\varepsilon_{\text{тп}}$  – величина скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в ближайшем к поверхности узле конечно-разностной сетки,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $n_{\text{тп}}$  – расстояние по нормали  $n$  от твердой поверхности до ближайшего к поверхности узла конечно-разностной сетки, м;

- в плоскости поперечного сечения открытых проемов:

$$\partial k / \partial n = 0; \quad \partial \varepsilon / \partial n = 0, \quad (1.26)$$

где  $n$  – направление по нормали к плоскости открытого проема.

1.5.8. Уравнения (1.19) и (1.20) могут быть приведены к стандартному виду (1.10).

## 1.6. Моделирование радиационного теплообмена

1.6.1. Для расчета лучистого теплообмена в излучающем, поглощающем и рассеивающем газе записывается дополнительное интегродифференциальное уравнение для переноса лучистой энергии в газовой среде, которое решается различными методами в зависимости от конкретных условий задачи. Уравнение имеет вид [17]:

$$s \nabla I_{\lambda}(x, s) + (\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda}) I_{\lambda}(x, s) = \alpha_{\lambda} I_{\lambda_0}(x, s) + \frac{\beta_{\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(x, s') \gamma_{\lambda}(s, s') d\omega', \quad (1.27)$$

где  $\alpha_{\lambda}$ ,  $\beta_{\lambda}$  – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния излучения,  $1/\text{м}$ ;  $\gamma_{\lambda}(s, s')$  – спектральная индикатриса рассеяния;  $\omega'$  – телесный угол в направлении  $s'$ , рад;  $I_{\lambda}(x, s)$ ,  $I_{\lambda_0}(x, s)$  – спектральная интенсивность излучения в точке  $x$  в направлении  $s$  данного и абсолютно черного тела,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

1.6.2. Уравнение переноса излучения (1.27) может быть решено достаточно точными и универсальными численными способами, например, зональным методом или стохастическим методом Монте-Карло [17]. Однако эти методы не вполне совместимы с сеточными методами решения уравнений переноса импульса и энергии полевой модели термогазодинамики пожара, что требует разных численных алгоритмов и приводит к существенному усложнению программного комплекса. Кроме того, спектральные характеристики излучения внутри газовой среды помещения при пожаре недостаточно изучены. Поэтому используют различные приближенные методы решения уравнения (1.27).

1.6.3. Предполагаем, что существует локальное термодинамическое равновесие внутри излучающего объема. Рассмотрим четыре приближенных математических модели расчета лучистого теплопереноса, наиболее часто используемые при моделировании пожаров [17]:

- оптически прозрачный неизлучающий газ;
- оптически толстый слой;
- оптически тонкий слой;
- диффузионный метод (метод моментов).

1.6.4. При использовании приближения оптически прозрачного неизлучающего газа в уравнении энергии (1.5) принимаем:

- коэффициент радиационной теплопроводности равен  $\lambda_{л} = 0$ ;
- источниковый член  $q_{вл} = 0$ .

1.6.5. В случае оптически толстого слоя (оптическая толщина  $\tau_o \gg 1$ , т.е. средняя длина свободного пробега фотона мала по сравнению с характерным размером среды)  $q_{вл} = 0$ , а коэффициент лучистой теплопроводности равен:

$$\lambda_{л} = \frac{16}{3} \frac{\sigma T^3}{k_p}, \quad (1.28)$$

где  $k_p$  – интегральный коэффициент ослабления излучения, 1/м;  $T$  – локальная температура слоя, К;  $\sigma$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для гетерогенной среды при этом необходимо проводить расчет образования, движения и коагуляции твердых частиц дыма для определения их размеров и концентрации, определяющих главным образом излучательную, поглощательную и пропускательную способности среды. При этом коэффициент ослабления определяется как  $k_p = \frac{\pi n d_p^2}{4}$ , где  $d_p$  – средний диаметр частиц дыма, м;  $n$  – объемная концентрация частиц, 1/м<sup>3</sup>.

1.6.6. Для оптически тонкого слоя ( $\tau_o \ll 1$ ) принимается, что  $\lambda_{л} = 0$ , а источниковый член уравнения энергии определяется как:

$$q_{вл} = 4\pi \epsilon_p \sigma T^4, \quad (1.29)$$

где  $\epsilon_p$  – интегральная степень черноты газа.

1.6.7. При промежуточной величине оптической толщины слоя газа используется диффузионный метод (метод моментов). При этом  $\lambda_{л} = 0$ , а источниковый член в уравнении энергии равен:

$$q_{вл} = -\frac{4\pi}{3} \left( \frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right), \quad (1.30)$$

где  $I_o$  – интенсивность излучения, определяемая из решения уравнения:

$$\frac{1}{k_p} \left( \frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi_p (I_o - I_b(T)), \quad (1.31)$$

где  $\chi_p$  – интегральный коэффициент излучения, 1/м;  $I_b(T) = \sigma T^4$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>.

При выполнении закона Кирхгофа [12]:

$$\chi = \varepsilon_p = 1 - e^{-k_p L}, \quad (1.32)$$

где  $\varepsilon_p$  – интегральная степень черноты слоя газа толщиной  $L$ .

Коэффициент ослабления излучения находится по рассчитанной оптической плотности дыма (уравнение (1.7)):

$$k_p = \lambda^* D_{оп}, \quad (1.33)$$

где  $D_{оп}$  – локальная величина оптической плотности дыма, Нп/м;  $\lambda^*$  – коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный [3], 1/Нп.

1.6.8. При промежуточной величине оптической толщины слоя газа можно применять потоковый метод [5].

1.6.9. Для определения излучения только от факела в случае оптически прозрачной среды вне него степень черноты факела может быть определена следующим образом. Сначала определяется число Бугера [6]:

$$Bu = k d_{эКВ}, \quad (1.34)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления газовой среды в объеме факела, который может быть определен по экспериментальным соотношениям работы [14], 1/м;  $d_{эКВ} = \sqrt{4F_r / \pi}$  – эквивалентный диаметр поверхности горения, м;  $F_r$  – площадь поверхности горючей жидкости, м<sup>2</sup>. Затем по этому значению находится степень черноты факела по экспериментальным данным работы [6] с учетом свойств конкретного горючего материала.

По данным работы [6] при числе Бугера  $Bu < 1$  можно применять закон аддитивности, т.е. не учитывать взаимное влияние излучения и конвекции, а среду рассматривать как оптически прозрачную. Взаимное влияние конвекции и излучения проявляется при определении граничных условий на твердых поверхностях. При  $Bu > 1$  рассматривается приближение оптически толстого слоя и учитывается влияние только излучения на характеристики турбулентности через увеличение толщины теплового пограничного слоя.

1.6.10. Для конкретных исходных данных задачи требуется уточнение и адаптация существующих математических моделей лучистого переноса в сплошной среде с привлечением дополнительной экспериментальной информации по коэффициентам переноса при реальной термогазодинамической картине пожара.

1.6.11. Могут использоваться иные модели радиационного теплопереноса, приведенные в литературе [5, 17], например, метод дискретного радиационного переноса.

## 1.7. Расчет процесса выгорания горючей нагрузки

1.7.1. При горении горючей жидкости скорость ее выгорания определяется следующими полуэмпирическими соотношениями [18]:

$$\text{при } \tau \leq \tau_{\text{ст}}: \Psi_{\Gamma} = \Psi_0 F_{\Gamma} \sqrt{\tau / \tau_{\text{ст}}}; \quad (1.35)$$

$$\text{при } \tau > \tau_{\text{ст}}: \Psi_{\Gamma} = \Psi_0 F_{\Gamma}, \quad (1.36)$$

где  $\tau$  – время горения, с;  $\tau_{\text{ст}}$  – время стабилизации горения, с;  $F_{\Gamma}$  – площадь открытой поверхности горючей жидкости, м<sup>2</sup>;  $\Psi_0$  – удельная скорость выгорания горючей жидкости, кг/(с·м<sup>2</sup>).

Данные о времени стабилизации горения и удельной скорости выгорания горючей жидкости определяются по таблицам справочной литературы (например, [18]) в зависимости от ее вида. Параметры процесса выгорания для ряда горючих жидкостей приведены в прил. 3.

1.7.2. Скорость выгорания твердого горючего материала определяется по формуле [18]:

$$\Psi_{\Gamma} = \Psi_0 F_{\Gamma}, \quad (1.37)$$

где  $F_{\Gamma} = \pi r^2$  – площадь открытой поверхности твердого горючего материала, охваченная горением, м<sup>2</sup>;  $r = w_{\text{лс}} \tau$  – радиус горения, м;  $w_{\text{лс}}$  – линейная скорость распространения пламени по поверхности твердого горючего материала, м/с.

Данные удельной скорости выгорания горючего материала в зависимости от его вида приводятся в справочной литературе (например, [18]). Параметры процесса выгорания для ряда твердых горючих материалов представлены в прил. 3.

1.7.3. При горении горючего газа задаются массовая скорость и размеры области его натекания, параметры газа (давление и температура).

1.7.4. Для определения величины оставшейся массы жидкого или твердого горючего материала после частичного его выгорания решается уравнение закона сохранения массы [18]:

$$\frac{dM}{d\tau} = -\Psi_{\Gamma}, \quad (1.38)$$

где  $M$  – остаточная масса горючего материала.

## 1.8. Моделирование горения

1.8.1. В основных уравнениях полевой модели область горения (факел) моделируется внутренними источниками энергии, массы газовой сре-

ды и твердых частиц дыма или задаются экспериментальные значения полей температур и других параметров в этой области горения.

Моделирование области горения может осуществляться при помощи источников энергии, массы и дыма без учета химической кинетики и термогазодинамических условий в области горения, а также непосредственно моделью горения.

1.8.2. Среди непосредственно моделей горения можно выделить следующие:

- модель диффузионно-вихревая [25];
- модель ламинарных элементов пламени [5] и т.д.

В моделях горения, как правило, предполагают, что химическое взаимодействие в области горения протекает бесконечно быстро по сравнению с тепломассообменными процессами. Поэтому скорость протекания химических реакций горения определяется тепломассообменными процессами, т.е. скоростями доставки в зону горения и перемешивания горючего и окислителя (диффузионное горение).

1.8.3. При моделировании источниками энергии, массы газовой среды и дыма без учета химической кинетики и термогазодинамических условий в области горения вышеперечисленные источники задаются в объеме параллелепипеда с площадью основания, равной площади горючей нагрузки, охваченной горением. Высота параллелепипеда составляет  $h_f = k_f d_{\text{экв}}$ , где  $d_{\text{экв}} = \sqrt{4F_r / \pi}$  – эквивалентный диаметр поверхности горения, м;  $k_f$  – эмпирический коэффициент [6] для конкретной горючей нагрузки.

Мощность тепловыделения определяется по формуле:

$$Q_r = \eta \Psi_r Q_p^H, \quad (1.39)$$

где  $Q_r$  – мощность тепловыделения, Вт;  $Q_p^H$  – низшая рабочая теплота сгорания, Дж/кг;  $\eta$  – полнота сгорания.

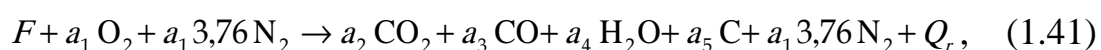
Полнота сгорания может быть рассчитана, например, по выражению [6]:

$$\eta = 0,63 + 0,2X_{O_{2m}} + 1500X_{O_{2m}}^6, \quad (1.40)$$

где  $X_{O_{2m}}$  – среднеобъемная массовая концентрация кислорода в помещении.

1.8.4. В моделях горения химическая реакция горения может быть одно- или многоступенчатой. При этом считается, что газовая смесь состоит из кислорода, азота, газифицированной горючей нагрузки и продуктов горения.

1.8.5. Процесс горения можно представить в виде одной одноступенчатой реакции:



где  $F$  – горючее вещество;  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коэффициенты реакции;  $Q_r$  – теплота реакции. Величинами масс остальных продуктов горения для

наиболее распространенных видов горючих материалов пренебрегаем [18, 24]. При необходимости можно учесть дополнительные образующиеся вещества в результате прямой реакции в уравнениях (1.41) и (1.6).

Азот необходимо учитывать в реакциях горения, потому что он поглощает часть тепла, выделяемого при реакции, и входит в состав продуктов горения.

1.8.6. Влияние турбулентности на протекание химических реакций горения может быть учтено с помощью различных математических моделей, например, с помощью диффузионно-вихревой модели [25]. Одноступенчатую реакцию горения можно представить в более упрощенном виде [5]:



где  $F$ ,  $O$ ,  $P$  – массы горючего, окислителя и продукта реакции;  $s$  – коэффициент.

Тогда скорость реакции равна [25]:

$$G_r = \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ 4 X_f; 4 \frac{X_o}{s}; 2 \frac{X_p}{s+1} \right\}, \quad (1.43)$$

где  $G_r$  – массовая скорость реакции в единице объема газовой среды, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $k$  – кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $X_f$ ,  $X_o$ ,  $X_p$  – локальные массовые концентрации продуктов выгорания горючего вещества, кислорода и продуктов горения.

1.8.7. Могут использоваться иные модели горения, приведенные в литературе [5, 19, 20], например, трехступенчатая реакция. Однако усложнение модели горения для определения необходимого времени эвакуации людей и фактических пределов огнестойкости строительных конструкций не приводит к повышению точности расчетов [19].

## 1.9. Условия однозначности

1.9.1. Условия однозначности к основной системе уравнений (1.1)-(1.10) и дополнительных соотношений (1.11)-(1.43) состоят из геометрических, физических, граничных и начальных условий.

1.9.2. В качестве геометрических условий задаются:

- координаты граничных поверхностей ограждающих конструкций помещения;
- координаты граничных поверхностей громоздких предметов, находящихся в помещении;
- координаты границ открытых и закрытых (вскрытие которых возможно под тепловым воздействием пожара) проемов;
- координаты границ открытой поверхности горючего материала или источника натекания газа.

1.9.3. В качестве физических условий задаются:

- теплофизические свойства компонентов газовой среды;
- теплофизические свойства материала ограждающих конструкций;
- теплофизические и химические свойства горючего материала.

1.9.4. В качестве граничных условий задаются:

- на внутренних поверхностях строительных конструкций:

проекция скоростей равны нулю:  $w_x = w_y = w_z = 0$ ;

для уравнения энергии:  $q_\Sigma = q_l + q_k$ , где  $q_l$  – плотность лучистого теплового потока;  $q_k$  – плотность конвективного теплового потока;

для остальных параметров  $\Phi$  (обобщенное уравнение (1.10)) принимается, что  $\partial\Phi/\partial n = 0$ , где  $n$  – нормаль к поверхности;

- на открытых проемах:

для всех параметров  $\Phi$  принимается, что  $\partial\Phi/\partial n = 0$  в области истечения газа наружу;

в области поступления наружного воздуха внутрь давление, температура и концентрации компонентов соответствуют параметрам атмосферного воздуха (смесь кислорода и азота);

- на наружных поверхностях ограждающих конструкций:

в соответствии с уравнением (1.16);

параметры наружного воздуха: температура, скорость и направление ветра и давление;

- на открытой поверхности горючего материала:

проекция скорости перпендикулярно поверхности горючего материала (с помощью уравнений (1.35)-(1.37));

плотность продуктов горения.

1.9.5. Начальные условия (в начальный момент времени перед пожаром):

- помещение заполнено неподвижной смесью (воздухом) кислорода и азота:

$$X_{O_2a} = 0,23; X_{N_2a} = 0,77; w_x = w_y = w_z = 0;$$

- параметры газовой смеси: температура и давление (распределение по высоте);

- скорость выгорания горючего материала:  $\Psi_T = 0$ .

Учебное издание

Пузач Сергей Викторович  
Казённов Владимир Михайлович  
Горностаев Роман Петрович  
Вараксин Алексей Юрьевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ  
И ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛЬНОГО ПОЖАРА

Учебное пособие

Редактор *Г.А. Науменко*  
Корректор *З.А. Малаховская*  
Компьютерная верстка *В.М. Казеннов*  
*Р.П. Горностаев*

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60х 90<sup>1</sup>/16. Бумага офсетная.  
Печ. л. 7,25. Уч.-изд. л. 5,25. Тираж 500 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Академия ГПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4