

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

С. Ф. Храпский

Прогнозирование опасных факторов пожара

Конспект лекций

Омск

Издательство ОмГТУ

2012

УДК 614.84(075)
ББК 38.96я73
Х90

Рецензенты:

А. А. Колоколов, д-р физ.-мат. наук, профессор, завкафедрой прикладной и вычислительной математики ОмГУ, завлабораторией дискретной оптимизации Омского филиала Института математики СО РАН;

Н. Ф. Ковалев, директор бюджетного учреждения Омской области «Управление противопожарной службы Омской области»

Храпский, С. Ф.

Х90 Прогнозирование опасных факторов пожара : конспект лекций / С. Ф. Храпский. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 80 с. : ил.

ISBN 978-5-8149-1220-6

Представлены и охарактеризованы опасные факторы пожара в помещении и их предельно допустимые значения. Рассмотрены задачи и методы прогнозирования опасных факторов пожара. Описаны математические модели термогазодинамических процессов, протекающих при развитии пожара в помещении. Изложены примеры численной реализации математических моделей пожара в виде компьютерных программ, указаны рекомендации по областям их практической применимости. Приведены аналитические соотношения для расчета критической продолжительности пожара и определения времени блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности 280104 (280705.65) «Пожарная безопасность».

УДК 614.84(075)
ББК 38.96я73

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. Исходные понятия и общие сведения	
о методах прогнозирования опасных факторов пожара	
в помещениях	7
Лекция 1. Понятие опасных факторов пожара и основные задачи	
их прогнозирования	7
Лекция 2. Общие сведения о методах прогнозирования опасных	
факторов пожара в помещениях	16
РАЗДЕЛ 2. Интегральная математическая модель пожара	
в помещении	24
Лекция 3. Исходные положения, основные понятия и уравнения	
интегральной математической модели пожара в помещении	24
Лекция 4. Уравнения газообмена помещений и теплофизические	
функции для замкнутого описания пожара.	
Учет процессов тушения пожара	33
Лекция 5. Численная реализация интегральной математической	
модели пожара в помещении	36
РАЗДЕЛ 3. Зонные математические модели пожара в помещении	39
Лекция 6. Основные положения зонного моделирования пожара	39
Лекция 7. Численная реализация зонных математических	
моделей пожара в помещении	44
РАЗДЕЛ 4. Дифференциальные математические модели пожара	
в помещении	46
Лекция 8. Основные положения дифференциального	
моделирования пожара	46
Лекция 9. Численная реализация дифференциальных	
математических моделей пожара в помещении	49

РАЗДЕЛ 5. Математическая постановка и решение задачи	
о динамике опасных факторов в начальной стадии пожара51
Лекция 10. Интегральная модель начальной стадии	
пожара в помещении	51
Лекция 11. Аналитические соотношения для расчета	
критической продолжительности пожара в помещении	59
РАЗДЕЛ 6. Заключительные положения 71
Лекция 12. Порядок определения времени блокирования	
эвакуационных путей опасными факторами пожара	
в помещении	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 76

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью освоения дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара» является изучение термогазодинамических процессов, протекающих при пожаре в помещении (здании, сооружении), формирование представлений о принципах математического описания (моделирования) этих процессов и расчетных методах прогнозирования опасных факторов пожара в помещении.

Задачи освоения дисциплины:

– изучение сложных и взаимосвязанных физических явлений, характерных для пожара в помещении, при которых, наряду с выделением тепловой энергии (вследствие горения), изменяются со временем температура и оптические свойства газовой среды, уменьшается содержание кислорода в помещении, образуются токсичные газы, происходит газообмен помещения через проемы с внешней средой (или со смежными помещениями), прогреваются строительные конструкции;

– теоретическая и практическая подготовка будущих специалистов к осуществлению научно обоснованного математического моделирования, расчета и прогнозирования динамики опасных факторов пожара в помещениях, а также к проведению исследований реально произошедших пожаров при их экспертизе.

Освоение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами при изучении высшей математики, информатики, физики, химии, термодинамики, теплотехники, гидрогазодинамики, теории горения и взрыва.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

– *знать* физические величины, характеризующие опасные факторы пожара в помещении (здании, сооружении), их количественные характеристики и предельно допустимые значения; базовые понятия математического моделирования физических явлений; уравнения термогазодинамических процессов, протекающих при пожаре в помещении; основные математические модели пожаров и методы их численной реализации с помощью компьютеров; аналитические соотношения для расчета критической продолжительности пожара в помещении; области практического применения математических моделей пожара в помещении;

– *уметь* работать с известными компьютерными программами, моделирующими развитие пожара в помещениях (зданиях, сооружениях); проводить

численные эксперименты по моделированию динамики опасных фактов пожара применительно к решению профилактических и тактических задач (разработка рекомендаций по обеспечению безопасной эвакуации людей при пожаре, создание и совершенствование систем сигнализации и автоматических систем пожаротушения, разработка оперативных планов тушения пожаров, оценка фактических пределов огнестойкости строительных конструкций и т. д.), а также к исследованию реально произошедших пожаров; рассчитывать критическую продолжительность пожара и определять время блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара в помещении.

Издание подготовлено в соответствии с требованиями ГОС ВПО по специальности 280104 (280705.65) «Пожарная безопасность» и рабочей программой по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара».

РАЗДЕЛ 1. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Лекция 1. Понятие опасных факторов пожара и основные задачи их прогнозирования

В соответствии со статьей 2 Федерального закона № 123-ФЗ [1] *опасными факторами пожара* (ОФП) являются такие факторы, «воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу».

К *опасным факторам* пожара, воздействующим на людей и имущество, относятся (статья 9 Федерального закона № 123-ФЗ [1]):

- 1) пламя и искры;
- 2) тепловой поток;
- 3) повышенная температура окружающей среды;
- 4) повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения (CO , CO_2 , HCl , HCN , COCl_2 , NO_2 , H_2S);
- 5) пониженная концентрация кислорода;
- 6) снижение видимости в дыму.

К *сопутствующим проявлениям* опасных факторов пожара относятся (статья 9 Федерального закона № 123-ФЗ [1]):

- 1) осколки, части разрушившихся зданий, сооружений, строений, транспортных средств, технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- 2) радиоактивные и токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- 3) вынос высокого напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- 4) опасные факторы взрыва, произошедшего вследствие пожара;
- 5) воздействие огнетушащих веществ.

Опасные факторы пожара являются физическими понятиями и, следовательно, каждый из них представлен в количественном отношении одной или несколькими физическими величинами.

Пламя – это видимая часть пространства (пламенная зона), внутри которой протекает процесс окисления (горения) и происходит тепловыделение, а также генерируются токсичные газообразные продукты горения и поглощается заби-

раемый из окружающего пространства кислород. Кроме того, в границах этой части пространства (зоны) образуется специфическая дисперсная среда, особые оптические свойства которой обусловлены процессами рассеяния энергии световых волн вследствие их многократного отражения от мельчайших твердых (жидких) частиц. Этот процесс образования дисперсной среды, ухудшающей видимость, принято называть *процессом дымообразования*.

По отношению к объему помещения, заполненному газом, пламенную зону можно рассматривать, с одной стороны, как «источник», поставляющий в помещение тепловую энергию и токсичные продукты горения, а также мельчайшие твердые (жидкие) частицы, из-за которых ухудшается видимость. С другой стороны, пламенную зону можно рассматривать как «сток», в который уходит кислород из помещения.

Содержание понятия «пламя» представлено в количественном отношении следующими величинами:

1) характерными размерами пламенной зоны (очага горения), например площадью горения (площадью пожара) F_G , м²;

2) количеством сгорающего (окисляемого) за единицу времени горючего материала (ГМ) (скоростью выгорания) ψ , кг·с⁻¹;

3) мощностью тепловыделения $Q_{\text{пож}}$, Вт: $Q_{\text{пож}} = \psi \cdot Q_H^p$, где Q_H^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж·кг⁻¹;

4) количеством генерируемых за единицу времени в пламенной зоне токсичных газов $\psi \cdot L_i$, кг·с⁻¹, где L_i – количество i -го токсичного газа, образующегося при сгорании единицы массы ГМ;

5) количеством кислорода, потребляемого в зоне горения $\psi \cdot L_I$, кг·с⁻¹, где L_I – количество кислорода, необходимое для сгорания (окисления) единицы массы горючего;

6) оптическим количеством дыма, образующегося в очаге горения $\psi \cdot D$, Непер·м²·с⁻¹, где D – дымообразующая способность горючего материала, Непер·м²·кг⁻¹.

Тепловой поток количественно характеризуется плотностью q , Вт·м⁻².

Температура окружающей среды (температура среды, заполняющей помещение) является параметром состояния (обозначается T , если используется размерность «Кельвин», или t , если используется размерность «градус Цельсия»).

Токсичные продукты горения количественно характеризуются парциальной плотностью (или концентрацией) каждого токсичного газа. Парциальная плотность компонентов газовой среды в помещении является параметром состояния,

обозначается ρ_i , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Сумма парциальных плотностей всех компонентов газовой среды равна плотности газа ρ . Концентрацией токсичного i -го газа обычно называют отношение парциальной плотности этого газа ρ_i к плотности газа ρ :

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho}.$$

Концентрация кислорода в помещении количественно определяется значением парциальной плотности кислорода ρ_1 или отношением ее к плотности газовой среды в помещении:

$$x_1 = \frac{\rho_1}{\rho}.$$

Дым количественно представляют параметром, называемым оптической концентрацией дыма. Этот параметр обозначают буквой μ , его размерность – Непер $\cdot\text{м}^{-1}$. (Иногда параметр μ называют натуральным показателем ослабления.) Расстояние видимости в дыму $l_{\text{вид}}$ и оптическая концентрация дыма связаны между собой соотношением:

$$l_{\text{вид}} = \frac{2,38}{\mu}.$$

Вышеприведенные величины: температура среды, парциальные плотности (концентрации) токсичных газов и кислорода, оптическая плотность дыма – являются параметрами состояния среды, заполняющей помещение при пожаре. Они характеризуют свойства газовой среды в помещении. Начиная с момента возникновения пожара и далее в процессе его развития эти параметры состояния непрерывно изменяются во времени, что и определяет сущность динамики ОФП.

Многочисленными исследованиями [10, 11, 17, 26, 28] установлено, что во влажной атмосфере вторую степень ожога вызывает воздействие температуры 55 °С в течение 20 с и 70 °С – в течение 1 с, а плотность лучистых тепловых потоков 3500 Вт $\cdot\text{м}^{-2}$ вызывает ожоги дыхательных путей и открытых участков кожи практически мгновенно. К летальному исходу приводят следующие объёмные концентрации токсичных веществ в воздухе: 1,0 % окиси углерода (CO) – за 2–3 мин, 5 % двуокиси углерода (CO₂) – за 5 мин, 0,005 % цианистого водорода (HCN) – практически мгновенно. При объемной концентрации хлористого водорода (HCL) 0,01–0,015 % останавливается дыхание. При снижении концен-

трации кислорода в воздухе с 23 до 16 % ухудшаются двигательные функции организма, а мускульная координация нарушается до такой степени, что самостоятельное движение людей становится невозможным. Снижение концентрации кислорода до 9 % приводит к смерти через 5 мин.

Совместное действие некоторых факторов усиливает их воздействие на организм человека (*синергетический эффект*). Так токсичность окиси углерода увеличивается при наличии дыма, снижении концентрации кислорода и повышении температуры и влажности среды; токсичность двуокиси азота – при понижении концентрации кислорода и повышении температуры. Синергетический эффект обнаруживается при совместном воздействии цианистого водорода и окиси углерода.

Особое воздействие на людей оказывает дым, представляющий собой смесь несгоревших частиц углерода размером частиц от 0,05 до 5,0 мкм. На этих частицах конденсируются токсичные газы. Поэтому воздействие дыма на человека также имеет синергетический эффект.

В настоящее время при пожарах в виду применения новых строительных, отделочных и конструктивных материалов выделяется значительное число токсинов, пагубно воздействующих на человека (табл. 1.1, 1.2).

Таблица 1.1

**Источники образования токсичных компонентов
газовоздушной смеси при пожарах**

Источник образования (материал)	Токсичные компоненты
Горючие материалы, содержащие углерод	Окись и двуокись углерода
Целлулоид, полиуретаны	Оксиды азота
Древесина, шелк, целлюлозные материалы, вискоза, азотосодержащие пластмассы	Цианистый водород
Древесина, бумага	Акролеин
Резина, тиоколы	Диоксиды серы
Поливинилхлорид, фторированные пластмассы	Соляная, бромистоводородная, плавиковая кислоты, фосфоген
Меламин, нейлон, мочевиноформальдегид	Аммиак
Древесина, нейлон, полиэфирные смолы, фенолформальдегид	Альдегиды
Полистирол	Бензол
Пенополиуретан	Изоцианаты

Таблица 1.2

**Характер и результаты воздействия на человека токсичных веществ,
выделяющихся при пожаре**

Токсичное вещество, формула	Характер воздействия	Концентрация	Результат воздействия
Оксид углерода (угарный газ), CO	В результате соединения с гемоглобином крови образуется неактивный комплекс – карбоксигемоглобин, вызывающий нарушение доставки кислорода к тканям организма. Выделяется при горении полимерных материалов. Выделению способствует медленное горение и недостаток кислорода	0,2–1 % об.	Гибель человека за период от 3 до 60 мин
Диоксид углерода (углекислый газ), CO ₂	Вызывает учащение дыхания и увеличение легочной вентиляции, оказывает сосудорасширяющее действие, вызывает сдвиг pH крови, способствует повышению уровня адреналина	12 % об.	Потеря сознания, смерть в течение нескольких минут
		20 % об.	Немедленная потеря сознания и смерть
Хлороводород (хлористый водород), HCl	Снижает возможность ориентации человека: соприкасаясь с влажным глазным яблоком, превращается в соляную кислоту. Вызывает спазмы дыхания, воспалительные отеки и, как следствие, нарушение функции дыхания. Образуется при горении хлоросодержащих полимеров, особенно ПВХ	2000–3000 мг/м ³	Гибель человека в течение нескольких минут

Нормативными документами [2, 3] установлены *критические (предельно допустимые)* значения (ПДЗ) опасных факторов пожара (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Предельно допустимые значения опасных факторов пожара

ОФП, обозначение, размерность	ПДЗ
Температура t , °C	70
Тепловой поток q , Вт/м ²	1400
Парциальная плотность, кг/м ³ : – кислорода O ₂ , ρ_1 – оксида углерода CO, ρ_2 – диоксида углерода CO ₂ , ρ_3 – хлористого водорода HCl, ρ_4 – цианистого водорода HCN, ρ_5 – фосгена COCl ₂ , ρ_6 – окислов азота NO ₂ , ρ_7 – сероводорода H ₂ S, ρ_8	0,226 (15 %) 0,00116 0,11 0,023·10 ⁻³ 0,2·10 ⁻³ 0,2·10 ⁻³ 1·10 ⁻³ 1,1·10 ⁻³
Дальность видимости $L_{\text{вид}}$, м	20

При рассмотрении воздействия ОФП на элементы конструкций и оборудование используются критические значения параметров, характеризующих термическое воздействие пожара на них. Например, при оценке воздействия пожара на железобетонные конструкции применяется понятие «критическое значение температуры арматуры» этих конструкций. Обычно считается, что при нагревании арматуры до 400–450 °C происходит разрушение железобетонной конструкции [17, 28]. При оценке воздействия пожара на остекление предполагается, что при температуре газовой среды в помещении, равной 300–350 °C, будет происходить разрушение остекления. Скорость роста температуры в подвалах и кабельных помещениях по опытным данным [16, 17, 28] составляет в среднем 35–50 °C/мин.

В развитии пожара в помещении обычно выделяют *четыре основные стадии* [17] (рис. 1.1).

Начальная стадия пожара (НСП) включает время от возникновения горения до полного охвата пламенем (горением) поверхности горючей нагрузки. Продолжительность этой стадии зависит от вида и количества горючей нагрузки, мощности источника зажигания, конструктивно-планировочных характеристик помещения и может меняться в широких пределах. Температура в помещении характеризуется сильной неоднородностью, однако ее среднее значение и темп изменения невелики. Эта стадия очень важна для оценки характера по-

следующего развития пожара, разработки мероприятий по *обеспечению безопасной эвакуации людей*, обнаружению и тушению пожара.

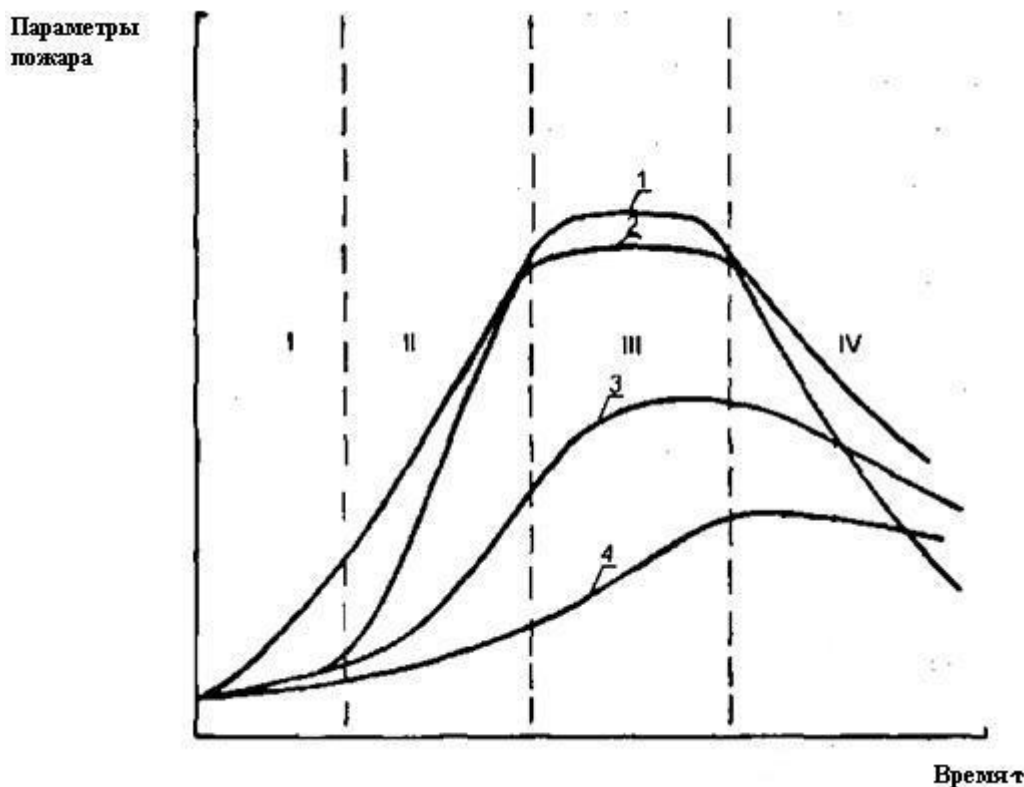


Рис. 1.1. Характер изменения параметров пожара в помещении:
 1 – среднеобъемная температура; 2 – скорость выгорания; 3 – температура поверхности строительной конструкции; 4 – теплотехнический параметр, определяющий огнестойкость строительной конструкции (температура прогрева защитного слоя); I – начальная стадия пожара; II – развивающаяся стадия пожара; III – развитая стадия пожара; IV – затухающая стадия пожара

Развивающаяся стадия пожара включает период от полного охвата пламенем поверхности пожарной нагрузки до достижения постоянной скорости выгорания материалов пожарной нагрузки.

Эта стадия характеризуется резким увеличением скорости тепловыделения и интенсивным изменением температуры в помещении. В развивающейся стадии пожара строительные конструкции подвергаются быстро нарастающему интенсивному тепловому воздействию.

В *развитой стадии* пожар достигает наибольшей возможной интенсивности, все параметры, характеризующие развитие пожара (скорость выгорания,

газообмен, концентрация продуктов сгорания, температура, тепловые потоки), имеют максимальные и практически постоянные значения.

Затухающая стадия пожара начинается с момента уменьшения скорости выгорания пожарной нагрузки и заканчивается моментом достижения исходного значения среднеобъемной температуры.

Тепловыделение и средняя температура газовой среды в очаге пожара уменьшаются, однако в начале этой стадии остаются еще достаточно высокими и оказывают значительное тепловое воздействие на конструкции.

Продолжительность НСП принято ассоциировать с так называемой *критической продолжительностью пожара* (КПП) [13, 16, 17, 26, 28], при которой значения ОФП достигают предельно допустимых для жизни и здоровья людей параметров (табл. 1.3). Другими словами, КПП – это интервал времени, в течение которого человеком еще не потеряны ориентация и сознание, он сохраняет способность реально оценивать окружающую обстановку, уверенно принимать решения и выполнять соответствующие действия по эвакуации. Для разных ОФП значения КПП в общем случае могут существенно различаться. Наименьшее из них используется для определения необходимого времени эвакуации.

Основными задачами расчета динамики ОФП являются:

- определение критической продолжительности пожара (необходимого времени эвакуации);
- определение фактических пределов огнестойкости строительных конструкций;
- определение времени срабатывания тепловых, дымовых, концентрационных, радиационных и комбинированных пожарных извещателей;
- получение термогазодинамической картины пожара (обстановки на пожаре).

Полученные характеристики динамики ОФП применяются при решении следующих задач пожарной безопасности:

- 1) анализ объемно-планировочных и конструктивных решений проектируемых, реконструируемых и существующих зданий и сооружений;
- 2) разработка планов эвакуации и пожаротушения;
- 3) выбор и оптимизация толщин огнезащитных покрытий строительных конструкций;
- 4) проектирование автоматических систем пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения;
- 5) проведение пожарно-технических экспертиз и расследований пожаров.

Приоритетность и актуальность проблемы обеспечения безопасной эвакуации людей из помещений в случае возникновения пожара общепризнаны. Одно из направлений решения этой проблемы – выполнение научно обоснованных требований к способам обеспечения безопасности людей при пожаре. Каждый объект должен иметь такое объёмно-планировочное и техническое исполнение, которое позволяло бы осуществлять эвакуацию людей до наступления предельно допустимых для человека значений ОФП. Для обеспечения безопасности людей следует предусмотреть необходимые количество и размеры, соответствующее конструктивное исполнение эвакуационных путей и выходов, которые могут позволить людям покинуть помещение в случае возникновения пожара за время, которое составляет 80 % от наименьшего значения критической продолжительности пожара [2– 5] (значение 20 % учитывает возможные погрешности установления предельно допустимой для человека температуры). Это время называют *необходимым временем эвакуации*.

Эвакуация людей может быть успешной лишь в том случае, если расчётное время эвакуации (определяется пропускной способностью путей эвакуации людских потоков [16]) меньше необходимого.

Таким образом, для реализации указанного условия безопасности людей необходимо располагать методом расчёта КПП. Вопрос о точности метода расчёта КПП является ключевым в решении задачи обеспечения безопасной эвакуации. Недооценка пожарной опасности, равно как и её переоценка, может привести к большим социальным и экономическим потерям.

Уровень обеспечения безопасности людей при возникновении пожара в большой степени зависит от достоверности результатов вычисления КПП. Критическая продолжительность пожара определяется на основе прогнозирования динамики опасных факторов пожара, для чего используются математические модели пожара. Математическая модель пожара должна описывать изменение параметров состояния среды в помещении в течение времени, а также изменение параметров состояния ограждающих конструкций этого помещения и различных элементов технологического оборудования.

Актуальной и практически значимой задачей является разработка методов как можно более точного прогнозирования ОФП.

Лекция 2. Общие сведения о методах прогнозирования опасных факторов пожара в помещениях

Современные научные методы прогнозирования ОФП и поведения строительных конструкций в условиях пожара базируются на *математических моделях* пожара в помещении.

Модель – это объект любой природы, который с той или иной степенью адекватности заменяет реальный исследуемый объект, при этом изучение реального объекта может быть произведено на его модели в практически реализуемой и удобной форме [7, 8, 27]. Обычно модель позволяет получить новую информацию о реальном объекте. Модели выбираются таким образом, чтобы они были проще и доступнее для исследования, чем реальные объекты (тем более, что существуют такие объекты, которые вообще нельзя активно исследовать).

Процесс исследования объектов на их моделях называют *моделированием*. *Моделирование* – одна из основных категорий теории познания: на идее моделирования по существу базируется любой метод научного исследования – как теоретический (при котором применяются различного рода знаковые, абстрактные модели), так и экспериментальный (использующий предметные модели) [7, 8, 27].

В зависимости от средств, с помощью которых реализованы модели, различают, прежде всего, материальное (предметное) и идеальное (абстрактное) моделирование.

Материальным называется моделирование, в котором исследование ведется на основе модели, воспроизводящей основные геометрические, физические, динамические и функциональные характеристики изучаемого объекта. Частным случаем материального моделирования является физическое моделирование, при котором моделируемый объект и модель имеют одну и ту же физическую природу.

Идеальные модели связаны с использованием каких-либо символических схем: графических, логических, математических и др.

В XIX веке основной формой была масштабная уменьшенная модель некоего будущего объекта, над которой можно было работать, исследуя ее свойства с учетом подобия физических процессов (например, натурные модели мостов, зданий или кораблей). В середине XX века широко использовались аналоговые вычислительные машины, где различные процессы моделировались электрическими процессами в системах, состоящих из электрических элементов и приборов. В настоящее время для решения практических задач чаще всего использу-

ются различные вычислительные модели, реализованные в виде программ для компьютеров.

Все модели можно разделить на две основных группы – *количественные и качественные*.

Количественная модель оперирует некими численными характеристиками. Можно выполнить расчет какого-то параметра, получить его значения и при необходимости сравнить с какой-то величиной.

Качественные модели оперируют не численными величинами, а какими-то закономерностями. Как правило, это закономерности соотношений типа «больше/меньше». Любой исследователь постоянно сталкивается с этими моделями при инженерном осмыслении той или иной задачи. Например, если в замкнутом помещении, где возник пожар и где расположено достаточно много горючего материала, открыть проем (дверь или окно), то туда будет поступать больше кислорода и интенсивность горения увеличится. Следовательно, увеличится термическое воздействие на ограждающие конструкции помещений. Схема «если поступает кислород, то увеличивается воздействие на конструкции» является некоторой качественной моделью. Другая модель «если в помещении пожара открываются большие проемы в стенах, то больше тепла уходит наружу и температурное воздействие на конструкции уменьшается». Такие качественные характеристики процессов, как правило, определяются на основании инженерного видения специалистов и их знания основополагающих подходов, без выполнения каких-либо вычислений. В связи с этим возникает понятие «иерархия», и в этой иерархии качественные модели находятся на более высоком уровне обобщения, чем количественные.

Математическая модель – упрощенное отображение закономерностей реальных объектов и явлений в форме математических зависимостей [7, 27].

Математические модели классифицируются как аналитические и имитационные. В рамках аналитических моделей исследуемый объект и его свойства описывают отношениями-функциями в явной или неявной форме (дифференциальными или интегральными уравнениями, операторами) таким образом, что становится возможным непосредственно с помощью соответствующего математического аппарата сделать необходимые выводы об изучаемом объекте и его свойствах.

Например, одной из первых и простейших аналитических моделей пожара была модель [13, 17], отражающая зависимость температуры «стандартного» пожара от времени и используемая при испытании строительных конструкций на огнестойкость [17].

В отличие от аналитических, имитационные модели представляют собой совокупность программ для ЭВМ, с помощью которых воспроизводятся алгоритмы и процедуры, описывающие свойства и динамику интересующего процесса. Многократные вычислительные эксперименты, результаты которых обрабатываются с помощью методов математической статистики, позволяют изучить и проанализировать интересующий объект исследования.

Имитационные модели обычно применяют в тех случаях, когда не удастся построить достаточно простых и удобных для исследования аналитических моделей изучаемого объекта. Нередко приходится использовать сочетание относительно простых аналитических и более сложных имитационных моделей. В данном случае к имитационным (в широком смысле слова) моделям относятся и численное моделирование, связанное с методами современной вычислительной математики и реализуемое на ЭВМ.

Следует различать модели *детерминистические* и *вероятностные*. Первые однозначно описывают определенные процессы, течение которых можно полностью предсказать, зная их начальные условия и закономерности протекания. Вторые используют для описания случайных процессов, протекание которых характеризуется законами распределения вероятностей соответствующих случайных величин и однозначно предсказано быть не может.

Разумеется, результаты любого моделирования имеют практический смысл только в том случае, если модель адекватна реальному объекту (процессу), т. е. достаточно хорошо отображает действительность. Вопросы проверки адекватности моделей обычно рассматриваются на основе сравнения расчетных и экспериментальных натуральных результатов.

Отметим также понятие простейшей вербальной (словесной) модели пожара, которой является словесное описание возникновения и развития пожара.

Итак, сущность методологии математического моделирования состоит в замене исходного объекта его «образом» – математической моделью – и дальнейшем изучении модели с помощью реализуемых на компьютерах вычислительно-логических алгоритмов. Этот метод познания, конструирования, проектирования сочетает в себе многие достоинства как теории, так и эксперимента. Работа не с самим объектом, а с его моделью дает возможность «безболезненно», относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых мыслимых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (компьютерные, симуляционные, имитационные) эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на мощь современных вычислительных методов и технических инструментов информатики, подроб-

но, глубоко и полно изучать объекты, что невозможно при чисто теоретическом подходе.

Постановка вопроса о математическом моделировании какого-либо объекта порождает четкий план действий. Его можно условно разбить на три этапа: *модель – алгоритм – программа*.

На первом этапе выбирается (строится) «эквивалент» объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т. д.

Математическая модель (или ее фрагменты) исследуется теоретическими методами, что позволяет получить важные предварительные знания об объекте.

Второй этап – выбор (или разработка) алгоритма для реализации модели на компьютере. Модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательностью вычислительных и логических операций, которые нужно произвести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью. Вычислительные алгоритмы не должны искажать основные свойства модели (исходного объекта), быть экономичными и адаптирующимися к особенностям решаемых задач и используемых компьютеров.

На третьем этапе создаются программы, «переводящие» модель и алгоритм на доступный компьютеру язык. К ним также предъявляются требования экономичности и адаптивности. Их можно назвать «электронным» эквивалентом изучаемого объекта, уже пригодным для непосредственного испытания на «экспериментальной установке» – компьютере.

Создав триаду «*модель – алгоритм – программа*», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который вначале проходит этапы отладки и тестирования в «пробных» вычислительных экспериментах. После того как адекватность триады исходному объекту удостоверена, с моделью проводят разнообразные и подробные «опыты», дающие требуемые качественные и количественные свойства и характеристики объекта. Процесс моделирования сопровождается улучшением и уточнением всех звеньев триады.

Выделяют [7, 8, 9, 27] три основных *свойства* модели: *параметры, область определения и точность*.

При описании какого-либо реального объекта количество его параметров практически безгранично. Для большинства задач мелкие аспекты, например неровности на стенах и других ограждающих конструкциях, не являются существенными, а результат решения, как правило, определяется размерами помещения в целом. В зависимости от того, с какой целью строится модель и какую задачу с её помощью планируется решать, выделяются существенные и несущественные *параметры* модели. При использовании любой модели нужно

знать эти параметры, потому что отсутствие учета какого-либо из них, может привести к существенным погрешностям и ошибкам.

Другой аспект – это *область определения модели*. Рассмотрим для примера атриум (атриумом в зданиях называют большое пространство, объединяющее несколько этажей или являющееся одним большим помещением). Чтобы правильно применять формулы некоторой аналитической модели для расчета динамики задымления атриума, в нем должны соблюдаться определенные соотношения размеров и высоты. Как правило, считается, что над очагом пожара формируется колонка дымовых газов и вовлеченного воздуха, а также припотолочный слой. Это допущение накладывает ограничения на соотношение ширины и высоты помещения атриума, иначе формулы зависимостей, которые определены для больших помещений, в малых помещениях «работать» не будут, поскольку при контакте колонки восходящих нагретых газов и стен помещения могут возникнуть явления стратификации дымового слоя и другие аспекты. Поэтому область определения математической модели является важнейшим фактором, а применение модели вне области её определения может приводить к существенной недостоверности результатов.

Информация *о точности модели* показывает, насколько результат расчетов соответствует процессам в реальном мире. Специалисту это дает возможность на основании расчетных данных находить эффективные инженерные решения.

В настоящее время математическое моделирование является наиболее эффективной и удобной формой решения практических задач [9, 26, 27].

Математическая модель пожара в самом общем виде описывает изменение параметров состояния среды в помещениях, а также ограждающих конструкций и оборудования во времени. Основные уравнения, из которых состоит математическая модель пожара, вытекают из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики, закона сохранения массы и закона импульса. Эти уравнения отражают всю совокупность взаимосвязанных процессов, присущих пожару, таких как тепловыделение в результате горения, дымовыделения в пламенной зоне; выделение и распространение токсичных газов; газообмен помещений с окружающей средой и со смежными помещениями; теплообмен и нагревание ограждающих конструкций; снижение концентрации кислорода в помещении.

Методы прогнозирования ОФП классифицируют в зависимости от используемых видов математических моделей пожара, которые отличаются разным уровнем детализации описания термогазодинамических процессов горения в помещении. Выделяют три вида моделей: *интегральные, зонные, дифференциальные (полевые)*.

Интегральная модель пожара позволяет получить информацию, т. е. сделать прогноз о средних (по всему объему помещения) значениях термодинамических параметров состояния среды в данном помещении для любого момента времени развития пожара. Таким образом, состояние газовой среды оценивается через осредненные параметры. Соответственно температура ограждающих конструкций и другие подобные параметры оцениваются как осредненные по поверхности. При этом для того чтобы сопоставлять (соотносить) средние (т. е. среднеобъемные) параметры среды с их предельными значениями в рабочей зоне, используются формулы, полученные на основе экспериментальных исследований пространственного распределения температур, концентраций продуктов горения, оптической плотности дыма и т. д.

Совокупность всех этих соотношений (большая часть которых представляет собой обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка) обеспечивает математическое описание пожара в помещении на уровне усредненных термодинамических параметров состояния среды. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений интегральных моделей, описывающих развитие пожара в помещении, может быть получено только для некоторых частных случаев. В общем же случае эта система решается численными методами с помощью ЭВМ [24] .

Однако если газовая среда характеризуется значительной неоднородностью, то информативность интегрального метода может оказаться недостаточной для решения практических задач. Подобная ситуация обычно возникает на начальной стадии пожара и при локальных пожарах, когда в помещении наблюдаются струйные течения с явно выраженными границами и, кроме того, существует достаточно четкая стратификация (расслоение) среды.

Таким образом, область применения интегрального метода, в котором предсказанные моделью параметры пожара можно интерпретировать как реальные, практически ограничивается объемными пожарами, когда из-за интенсивного перемешивания газовой среды локальные значения параметров в любой точке близки к среднеобъемным. За пределами возможностей интегрального метода оказывается моделирование так называемых локальных пожаров, не достигших стадии объемного горения. Наконец, в ряде случаев даже при объемном пожаре распределением локальных значений параметров пренебрегать нельзя.

С другой стороны, интегральный метод является наиболее простым среди существующих методов моделирования пожаров.

Во многих случаях при исследовании пожара в помещении целесообразно выделить в нем несколько зон, для каждой из которых составить свою инте-

гральную модель пожара. Совокупность таких моделей называют *зонными (или зональными) моделями* пожара в помещении.

Зонная модель позволяет получить информацию о размерах характерных пространственных зон, возникающих при пожаре в помещении, и средних параметрах состояния среды в этих зонах. В качестве характерных пространственных зон выделяют либо *два слоя*: верхний слой продуктов горения (задымленная зона) и нижний слой невозмущенного воздуха (свободная зона), либо *три слоя*: в начальной стадии пожара припотолочную область пространства, область восходящего над очагом горения потока нагретых газов и область незадымленной холодной части пространства. Таким образом, состояние газовой среды в зональных моделях оценивается через осредненные термодинамические параметры не одной, а нескольких зон, причем межзонные границы обычно считаются подвижными.

Однако при создании зонных моделей необходимо делать большое количество упрощений и допущений, основанных на априорных предположениях о структуре потока. Такая методика не применима в тех случаях, когда отсутствует полученная из пожарных экспериментов информация об этой структуре и, следовательно, нет оснований для зонного моделирования. Кроме того, часто требуется более подробная информация о пожаре, чем осредненные по слою (зоне) значения параметров.

Процессы развития пожара наиболее точно описываются терминами *физических полей*. Отметим, что в пространстве задано поле некоторой величины (скалярной, векторной, тензорной), если в каждой точке этого пространства (или в какой-то его части) определено значение этой величины. Например, в помещении во время пожара требуется анализировать температурные поля, поля концентраций газов и дыма, поля давлений, скоростей газовых потоков и т. д.

Следовательно, можно сказать, что центральной проблемой математического моделирования пожара является разработка способов и методов получения всех характеристик его физических полей. Такие математические модели пожаров называют *дифференциальными (или полевыми)*. Дифференциальная модель потенциально может позволить рассчитывать значения всех локальных параметров состояния во всех точках пространства внутри помещения для любого момента развития пожара.

Дифференциальные модели, обозначаемые в зарубежной литературе аббревиатурой CFD (computational fluid dynamics), являются более мощным и универсальным инструментом, чем зональные; они основываются на совершенно ином принципе. Вместо одной или нескольких больших зон в дифференциальных моделях выделяется очень много (обычно тысячи или десятки тысяч) ма-

леньких контрольных объемов, никак не связанных с предполагаемой структурой потока. Для каждого из этих объемов с помощью численных методов решается система уравнений в частных производных, выражающих принципы локального сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов. Таким образом, динамика развития процессов определяется не априорными предположениями, а исключительно результатами расчета.

Перечисленные модели отличаются друг от друга объемом той информации, которую они могут дать о состоянии газовой среды в помещении и взаимодействующих с нею конструкций на разных этапах (стадиях) пожара.

В математическом отношении три названных выше вида моделей пожара характеризуются разным уровнем сложности.

Интегральная модель пожара в своей основе представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Искомые функции выступают среднеобъемные параметры состояния среды, независимым аргументом является время.

Основу *зонной модели* пожара в общем случае составляет совокупность нескольких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Параметры состояния среды в каждой зоне являются искомыми функциями, а независимым аргументом – время. Искомые функции выступают также координаты, определяющие положение границ характерных зон.

Наиболее сложной в математическом отношении является *дифференциальная (полевая) модель*. Ее основу составляет система уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов этой среды (кислород, оксид и диоксид углерода и т. д.), давлений и плотностей. Эти уравнения включают реологический закон Стокса, закон теплопроводности Фурье, законы диффузии и радиационного переноса и т. п. В общем случае к этой системе уравнений добавляется дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее процесс нагревания ограждающих конструкций. Искомые функции в этой модели являются плотность и температура среды, скорость движения газа, концентрации компонентов газовой среды, оптическая плотность дыма (натуральный показатель ослабления света в дисперсной среде) и другие, а независимыми аргументами – координаты и время.

Итак, для описания термогазодинамических параметров пожара применяются *три основных группы* детерминистических моделей: интегральные, зонные (зональные) и дифференциальные (полевые).

РАЗДЕЛ 2. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Лекция 3. Исходные положения, основные понятия и уравнения интегральной математической модели пожара в помещении

Интегральная математическая модель пожара представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение среднеобъёмных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара [13, 16, 17].

Эти уравнения выражают законы сохранения массы и энергии для открытой термодинамической системы [6, 25, 29, 30], которой является газовая среда, заполняющая помещение с проемами (окна, двери и т. п.) (рис. 3.1).

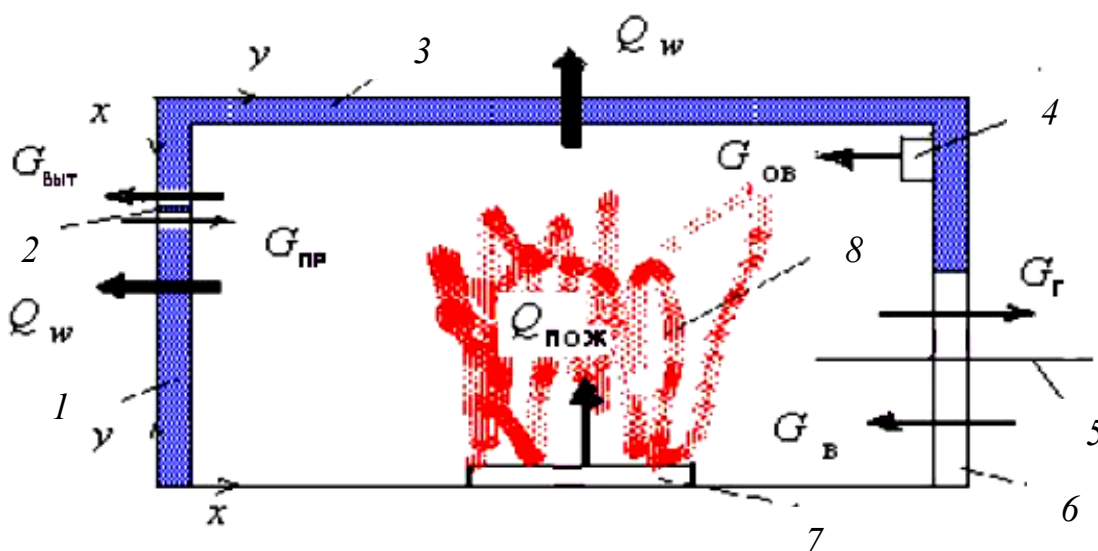


Рис. 3.1. Схема тепломассообмена при пожаре в помещении:

- 1 – стены; 2 – механическая приточно-вытяжная вентиляция; 3 – перекрытие;
4 – система пожаротушения; 5 – нейтральная плоскость; 6 – открытый проём;
7 – горючий материал; 8 – очаг горения

Ограждающие конструкции (пол, потолок, стены) и наружный воздух (атмосфера или соседнее помещение) являются внешней средой, с которой эта система взаимодействует путем тепло- и массообмена. В процессе развития пожара из помещения через проёмы различного назначения (окна, двери, техно-

логические отверстия и т. д.) выталкиваются нагретые газы G_T , а также поступает холодный воздух G_B . Кроме того, при работающих установках пожаротушения и приточно-вытяжной вентиляции в помещение подаются вентиляционный воздух $G_{ПР}$ и огнетушащие вещества $G_{ОВ}$, а через вентиляционные отверстия удаляются нагретые газы $G_{ВЫТ}$. Таким образом масса газа в помещении в течение времени изменяется. Вследствие горения пожарной нагрузки в помещение поступает количество теплоты $Q_{пож}$, выделяющееся в результате химических реакций в пламенной зоне за единицу времени. С поверхности горящего материала (т. е. из пламенной зоны) в помещение также поступает вещество в виде газообразных продуктов горения. Эта термодинамическая система взаимодействует с ограждающими конструкциями путем теплообмена Q_w . Следовательно, состояние рассматриваемой термодинамической системы изменяется в результате взаимодействия с окружающей средой.

В интегральной математической модели пожара принимается, что, во-первых, газовая среда внутри помещения при пожаре есть смесь идеальных газов. Во-вторых, в каждой точке пространства внутри помещения в любой момент времени реализуется локальное равновесие: локальные значения основных термодинамических параметров состояния (плотность, давление, температура) связаны между собой уравнением Клапейрона, т. е.

$$P = \rho \cdot R \cdot T, \quad (3.1)$$

где P – локальное давление, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$; ρ – локальная плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; R – газовая постоянная, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; T – локальная температура, К .

При пожаре поля локальных термодинамических параметров состояния являются нестационарными и неоднородными. Расчет этих полей представляет собой чрезвычайно сложную математическую задачу. Интегральный метод описания состояния газовой среды в помещении не решает эту задачу. В интегральном методе используются «интегральные» параметры состояния, такие как масса всей газовой среды и ее внутренняя тепловая энергия. Отношение этих двух интегральных параметров позволяет оценивать в среднем степень нагретости газовой среды. В процессе развития пожара значения указанных интегральных параметров состояния изменяются.

Особенностью рассматриваемой термодинамической системы (т. е. газовой среды в помещении) является то, что ее объем (т. е. пространственная конфигурация) в процессе развития пожара практически не изменяется. В связи с этим вместо вышеуказанных интегральных параметров состояния при исследовании процесса изменения состояния термодинамической системы целесообразно использовать среднеобъемные параметры – среднеобъемную плотность газовой среды и среднеобъемную (удельную) внутреннюю энергию.

Среднеобъемная плотность газовой среды в помещении представляет собой отношение массы газа, заполняющего помещение, к объему помещения, т. е.

$$\rho_m = \frac{M}{V}, \quad (3.2)$$

где M – масса газа, заполняющего помещение, кг; V – свободный объем помещения, м^3 .

Следует отметить, что

$$M = \int_V \rho \, dV. \quad (3.3)$$

С формальных позиций среднеобъемная плотность газовой среды есть результат осреднения по объему помещения всех значений локальной плотности, т. е.

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \rho \, dV. \quad (3.4)$$

Газовая среда в помещении представляет собой смесь кислорода, азота и продуктов горения. В процессе развития пожара количественное соотношение между компонентами смеси изменяется. В интегральном методе описания процесса изменения массы i -го компонента смеси в течение времени используется параметр, называемый среднеобъемной парциальной плотностью i -го компонента смеси.

Среднеобъемная парциальная плотность i -го компонента представляет собой отношение массы i -го компонента смеси (например O_2), содержащейся в объеме помещения, к объему помещения, т. е.

$$\rho_{mi} = \frac{M_i}{V}, \quad (3.5)$$

где M_i – масса i -го компонента, находящегося в помещении, кг.

Отметим, что с формальной точки зрения среднеобъемная парциальная плотность i -го компонента есть результат осреднения по объему помещения всех значений локальной парциальной плотности этого компонента, т. е.

$$\rho_{mi} = \frac{1}{V} \int_V \rho_i dV, \quad (3.6)$$

где ρ_i – локальное значение парциальной плотности i -го компонента, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Среднеобъемная (удельная) внутренняя энергия представляет собой отношение внутренней тепловой энергии всего газа, заполняющего помещение, к объему помещения, т. е.

$$u_m = \frac{U}{V}, \quad (3.7)$$

где U – внутренняя энергия всей газовой среды, заполняющей помещение, Дж.

В интегральном методе описания процесса изменения состояния термодинамической системы (т. е. газовой среды в помещении) вместо среднеобъемной внутренней энергии используется параметр состояния, называемый среднеобъемным давлением. Эти два параметра в формальном отношении являются взаимозаменяемыми и связаны следующим соотношением:

$$u_m = \frac{1}{k-1} \cdot p_m, \quad (3.8)$$

где $k = C_p / C_v$ – отношение изобарной и изохорной теплоемкостей идеального газа (показатель адиабаты). С достаточной для практики точностью можно утверждать, что показатель адиабаты во всех точках внутри помещения есть одна и та же постоянная величина.

Из последней формулы следует, что среднеобъемное давление прямо пропорционально среднеобъемной внутренней энергии. Среднеобъемное давление необходимо знать при расчетах газообмена помещения с внешней атмосферой.

Степень нагретости газовой среды характеризуется в среднем отношением внутренней энергии этой среды к ее массе. Отношение этих физических величин можно представить с помощью формул (3.2), (3.7) и (3.8) в следующем виде:

$$\frac{U}{M} = \frac{p_m}{(k-1) \cdot \rho_m}. \quad (3.9)$$

Так называемое «усредненное уравнение состояния газовой среды», заполняющей помещение, имеет тот же вид, что и уравнение Клапейрона для локальных параметров состояния:

$$p_m = \rho_m \cdot R \cdot T_m. \quad (3.10)$$

Это уравнение связывает между собой три интегральных параметра состояния газовой среды в помещении.

Газовая среда, заполняющая помещение при пожаре, содержит мельчайшие твердые частицы. Следует отметить, что доля тепловой энергии, приходящейся на эти частицы, пренебрежимо мала по сравнению с внутренней энергией газовой среды, находящейся в помещении. Несущественным является также вклад этих частиц в суммарную массу среды, заполняющей помещение при пожаре. Поэтому присутствие этих частиц можно не учитывать при вычислениях таких параметров состояния среды, как среднеобъемная плотность, среднеобъемное давление и среднемассовая температура. Однако присутствие этих частиц сильно изменяет оптические свойства среды в помещении. В результате рассеяния энергии световых волн из-за многократного диффузного отражения от этих мельчайших частиц (их диаметр приблизительно равен 0,2–1 мкм) ухудшается видимость. Оптические свойства среды, находящейся в помещении, характеризуются среднеобъемной оптической плотностью дыма.

Среднеобъемная плотность (концентрация) дыма представляет собой отношение оптического количества дыма, находящегося в помещении, к объему помещения, т. е.

$$\mu_m = \frac{S}{V}, \quad (3.11)$$

где S – оптическое количество дыма, Нп·м²; μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп·м⁻¹.

Оптическое количество дыма в помещении есть произведение средней концентрации твердых частиц на объем помещения и эффективное сечение *экстинкции* [6, 13], т. е.

$$S = N \cdot V \cdot \chi, \quad (3.12)$$

где N – средняя концентрация частиц, т. е. число частиц, приходящееся на единицу объема, 1/м³; χ – эффективное сечение экстинкции, м².

Чем выше оптическая плотность (концентрация) дыма, тем хуже видимость в помещении. Оптическая плотность дыма и дальность видимости связаны между собой следующим приближенным соотношением [13]:

$$\mu_m = \frac{2,38}{l_{вид}}, \quad (3.13)$$

где $l_{вид}$ – дальность видимости, м.

К числу важнейших понятий, используемых в дальнейшем, относятся упомянутые ранее теплота сгорания, стехиометрические коэффициенты и дымообразующая способность горючих материалов.

Дымообразующая способность горючего материала есть оптическое количество дыма, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала, т. е.

$$D = J \cdot \chi, \quad (3.14)$$

где D – дымообразующая способность горючего материала, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$; J – число частиц, образующихся при сгорании единицы массы горючего материала, кг^{-1} ; χ – эффективное сечение экстинкции частиц, м^2 .

Перейдем к представлению уравнений пожара, которые описывают изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в течение времени (в процессе развития пожара) [13].

Для общности вывода на этом этапе не будем рассматривать возможное наличие систем приточно-вытяжной вентиляции и пожаротушения (учет в уравнениях пожара этих систем представлен далее).

Первое уравнение – уравнение материального баланса пожара в помещении – вытекает из закона сохранения массы. Применительно к газовой среде, заполняющей помещение, этот закон можно сформулировать следующим образом: изменение массы газовой среды в помещении за единицу времени равно алгебраической сумме потоков массы через границы рассматриваемой термодинамической системы. Под границей системы здесь подразумевается воображаемая контрольная поверхность, ограничивающая пространство, внутри которого заключена рассматриваемая газовая среда (рис. 3.1). Объем пространства, заключенный внутри этой поверхности, называется свободным объемом помещения и обозначается буквой V .

Введем следующие обозначения:

а) G_B – расход поступающего воздуха из окружающей атмосферы в помещение, который имеет место в рассматриваемый момент времени процесса развития пожара, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$;

б) G_Γ – расход газов, покидающих помещение через проемы в рассматриваемый момент времени, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$;

в) ψ – скорость выгорания (скорость газификации) горючего материала в рассматриваемый момент времени, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$;

г) $\rho_m V$ – масса газовой среды, заполняющей помещение в рассматриваемый момент времени, кг .

За малый промежуток времени, равный $d\tau$, будет иметь место малое изменение массы газовой среды. В то же время можно считать, что значения G_Γ , G_B и ψ в течение этого малого промежутка времени остаются практически неизменными. С учетом вышесказанного уравнение материального баланса для газовой среды в помещении записывается следующим образом:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = G_B + \psi - G_\Gamma, \quad (3.15)$$

где левая часть уравнения есть изменение массы газовой среды за единицу времени в интервале, равном $d\tau$; правая часть есть алгебраическая сумма потоков массы.

Уравнение (3.15) называется уравнением материального баланса пожара.

Аналогичные рассуждения позволяют получить дифференциальные уравнения баланса массы кислорода, баланса продуктов горения и баланса оптического количества дыма:

– уравнение баланса массы кислорода

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_1 V) = x_{1B} G_B - x_1 n_1 G_\Gamma - \psi L_1 \eta; \quad (3.16)$$

– уравнение баланса токсичного продукта горения

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_2 V) = \psi L_2 \eta - x_2 n_2 G_\Gamma; \quad (3.17)$$

– уравнение баланса оптического количества дыма

$$\frac{d}{d\tau}(\mu_m V) = D\psi - \frac{\mu_m n_3}{\rho_m} G_\Gamma - k_c F_W. \quad (3.18)$$

В этих уравнениях использованы следующие обозначения: ρ_1 – среднееобъемная парциальная плотность кислорода, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; ρ_2 – среднееобъемная парциальная плотность токсичного продукта горения, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; μ_m – объемная оптическая концентрация дыма, $\text{Нп}\cdot\text{м}^{-1}$.

В правой части уравнения баланса массы кислорода (3.16) использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения: x_{I_0} – массовая доля кислорода в поступающем воздухе; $x_1 = \frac{\rho_1}{\rho_m}$ – средняя массовая доля кислорода в помещении; L_1 – стехиометрический коэффициент для кислорода (количество кислорода, необходимое для сгорания единицы массы горючего материала), $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$; η – коэффициент полноты сгорания; n_1 – коэффициент, учитывающий отличие концентрации кислорода в уходящих газах от среднееобъемной концентрации кислорода.

В правой части уравнения баланса токсичного продукта горения (3.17) использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения: L_2 – стехиометрический коэффициент для продукта горения (количество продукта горения, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала), $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$; $x_2 = \frac{\rho_2}{\rho_m}$ – средняя массовая доля токсичного газа в помещении; n_2 – коэффициент, учитывающий отличие концентрации токсичного газа в уходящих газах от среднееобъемной концентрации этого газа.

В правой части уравнения баланса оптического количества дыма (3.18) использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения: n_3 – коэффициент, учитывающий отличие оптической концентрации дыма в уходящих газах от среднееобъемного значения оптической концентрации дыма; F_w – площадь поверхности ограждений (потолка, пола, стен), м^2 ; k_c – коэффициент седиментации частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций, $\text{Нп}\cdot\text{с}^{-1}$. Коэффициент седиментации по физическому смыслу есть скорость осаждения частиц дыма.

На основе первого закона термодинамики выводится уравнение энергии пожара. Рассматриваемая термодинамическая система, т. е. газовая среда внутри контрольной поверхности, характеризуется тем, что она не совершает работы расширения. Кинетическая энергия видимого движения газовой среды в помещении пренебрежимо мала по сравнению с ее внутренней энергией. Потoki массы через некоторые участки контрольной поверхности (проемы) характеризуются тем, что в них удельная кинетическая энергия газа пренебрежимо мала по сравнению с удельной энтальпией.

С учетом сказанного уравнение энергии пожара выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \eta Q_H^p \psi + i_r \psi + c_{pв} T_b G_b - c_p T_m m G_r - Q_w. \quad (3.19)$$

Левая часть этого уравнения есть скорость изменения внутренней тепловой энергии газовой среды в помещении за единицу времени в рассматриваемый малый промежуток времени $d\tau$, т. е.

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \frac{dU}{d\tau}. \quad (3.20)$$

В правой части уравнения (3.19) первый член представляет собой количество тепла, поступающего за единицу времени в газовую среду в результате горения (скорость тепловыделения). Второй член есть поток энергии в помещении, поступающий вместе с продуктами газификации (пиролиз, испарение) горючего материала. Здесь величина i_r – энтальпия этих продуктов. Третий член – сумма внутренней тепловой энергии поступающего за единицу времени воздуха и работы проталкивания, которую совершает внешняя атмосфера. Четвертый член есть сумма внутренней тепловой энергии, уносимой за единицу времени уходящими газами, и работы выталкивания, которую совершает рассматриваемая термодинамическая система (m – коэффициент, учитывающий отличие температуры T_z и изобарной теплоемкости C_{pz} уходящих газов от среднеобъемной температуры T_m и среднеобъемной изобарной теплоемкости C_{pm} ($m = C_{pz} T_z / C_{pm} T_m$). Пятый член представляет собой тепловой поток, поглощаемый ограничивающими (ограждающими) конструкциями и излучаемый через проемы.

Представленные пять дифференциальных уравнений содержат шесть неизвестных функций – $\rho_m(\tau)$, $p_m(\tau)$, $T_m(\tau)$, $\rho_1(\tau)$, $\rho_2(\tau)$ и $\mu_m(\tau)$. Эту систему уравнений дополняет алгебраическое уравнение – усредненное уравнение состояния (3.10).

Начальные значения для этих функций задаются условиями, которые имеют место в помещении перед началом пожара.

Итак, в уравнениях пожара искомыми (неизвестными) функциями являются среднеобъемные параметры газовой среды, а независимой переменной – время. Кроме этих переменных величин, уравнения содержат целый ряд других физических величин, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся величины, заданные условиями однозначности. Эти величины пред-

ставляют собой сведения о размерах помещения (объем V и поверхность ограждений F_w) и свойствах горючего материала (теплота сгорания Q_n^p , стехиометрические коэффициенты L_1 , L_2 , дымообразующая способность D , энтальпия продуктов горения i_2). Ко второй – те величины, которые зависят, помимо всего прочего, от параметров состояния среды в помещении: это массовые расходы поступающего через проёмы воздуха G_B и уходящих через проёмы газов G_G (газообмен помещения), тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы Q_w , коэффициент полноты сгорания η , скорость тепловыделения $\eta Q_n^p \psi$. Для вычисления значений физических величин, относящихся ко второй группе, необходимо располагать дополнительными уравнениями, описывающими газообмен помещения и соответствующие теплофизические функции.

Лекция 4. Уравнения газообмена помещений и теплофизические функции для замкнутого описания пожара. Учет процессов тушения пожара

Для определения расходов воздуха G_B и газов G_G через проёмы необходимо устанавливать величину и знак текущей разности (перепада) давления внутри помещения и давления в окружающей атмосфере (или соседнем помещении).

Методика расчета законов распределения давлений по вертикали снаружи и внутри помещения представлена в [13]. Определив текущую ординату так называемой «нейтральной плоскости», или «плоскости равных давлений» (ПРД), можно установить характер режимов работы конкретного проёма (на выталкивание газа из помещения или на вход газа из окружающей среды или соседнего помещения) в текущий момент времени. По значениям среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении и геометрическим характеристикам проёма можно рассчитать соответствующие величины G_G или G_B . Отметим, что положение ПРД изменяется по мере развития пожара, поэтому изменяются во времени и режимы работы проёмов, а соответственно и текущие значения G_G и G_B .

Расходы уходящих и поступающих газов для помещения с несколькими разными (по размерам и расположению) вертикальными проёмами прямоугольной формы определяются по формулам [13, 22]:

$$G_B = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} \sum \xi_i b_i [(y_* - y_{Hi})^{1,5} - (y_* - Z_i)^{1,5}], \quad (4.1)$$

$$G_T = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \sum \xi_i b_i [(y_{Vi} - y_*)^{1,5} - (Z_i - y_*)^{1,5}], \quad (4.2)$$

где ρ_a – плотность газа (воздуха) снаружи помещения; ξ_i – коэффициент сопротивления i -го проёма; b_i – ширина i -го проёма; y_{Hi} – координата нижнего края i -го проёма; y_{Vi} – координата верхнего края i -го проёма; y_* – координата плоскости равных давлений (ПРД), отсчитываемая от пола помещения:

$$y_* = h - \frac{\rho_m - \rho_a}{g(\rho_a - \rho_m)}; \quad (4.3)$$

где h – половина высоты помещения; p_a – давление газа (воздуха) снаружи помещения на высоте, равной половине высоты помещения (т. е. при $y = h$); Z_i – формальный параметр i -го проёма, определяемый следующим образом:

$$Z_i = \begin{cases} y_{Hi}, & \text{при } y_* \leq y_{Hi} \\ y_*, & \text{при } y_{Hi} \leq y_* \leq y_{Vi} \\ y_{Vi}, & \text{при } y_* \geq y_{Vi} \end{cases} \quad (4.4)$$

Формулы для расчета газообмена через круглые вертикальные проёмы представлены в [13], через горизонтальные проёмы – в [22].

Так как при пожаре параметры состояния среды в помещении изменяются во времени, то и изменяются во времени расходы уходящих и поступающих газов (воздуха). Кроме того, в процессе развития в определенные моменты времени пожара могут вскрываться те или иные проемы, которые в начале пожара были закрыты. Например, когда среднеобъемная температура достигает значения 300–400 °С, разрушается остекление оконных проемов. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах параметров развития пожара.

В [13] также представлены формулы для расчета влияния ветра на величину разницы давлений внутри помещения и в окружающей среде. Этот фактор следует учитывать, если одна часть проёмов расположена на наветренной стороне здания, а другая – на подветренной. При этом из-за торможения потока воздуха на наветренной стороне здания наружное давление может быть существенно

выше (в зависимости от скорости ветра), чем на подветренной стороне, где образуется область пониженного давления.

Суммарный тепловой поток в ограждающие конструкции определяется из соотношения:

$$Q_w = \alpha F_w (T_m - T_w), \quad (4.5)$$

где F_w – суммарная площадь поверхности ограждений; T_w – осредненная по площади F_w температура внутренней поверхности ограждения, которая может быть рассчитана по эмпирической формуле [13]:

$$T_w = T_0 + 0,2(T_m - T_0) + 0,00065 (T_m - T_0)^2; \quad (4.6)$$

α – приведенный коэффициент теплоотдачи, определяемый из эмпирических выражений [13]:

$$\alpha \begin{cases} = 4,07 \sqrt[3]{T_m - T_w}, \text{ при } T_w < 333 \text{ К} \\ = 11,6 \exp[0,0023(T_m - 273)], \text{ при } T_m \geq 333 \text{ К} \end{cases} \quad (4.7)$$

Скорость выгорания горючего материала в каждый момент времени вычисляется по формуле

$$\psi = \psi_{уд} F_{\Gamma}, \quad (4.8)$$

где F_{Γ} – площадь горения;

$$\psi_{уд} = (\psi_{уд})_0 K + \frac{0,23(G_B + G_{ПР})(1-K)}{L_1 F_{\Gamma}}; \quad (4.9)$$

K – функция режима пожара, имеющая вид:

$$K = \left(\frac{x_1}{0,23}\right)^2 \exp \left[2\left(1 - \frac{x_1}{0,23}\right)\right]; \quad (4.10)$$

$(\psi_{уд})_0$ – удельная скорость выгорания горючего материала на открытом воздухе.

Представленная выше система уравнений описывает свободное развитие пожара, когда не осуществляется тушение и в помещение не подаются огнетушащие вещества. Факторы, обусловленные подачей огнетушащих веществ в объем помещения, учитываются путем введения в дифференциальные уравнения дополнительных членов. Например, при тушении инертными газами (ар-

гон, азот, диоксид углерода) уравнение материального баланса пожара записывается следующим образом:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = G_B + \psi - G_\Gamma + G_{ОВ}, \quad (4.11)$$

где $G_{ОВ}$ – массовый расход подачи огнетушащего вещества, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

Соответствующим образом изменяется в этом случае и уравнение энергии:

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \eta Q_H^p \psi + i_\Gamma \psi + c_{pB} T_B G_B - c_p T_m m G_\Gamma + c_{pOB} T_{ОВ} G_{ОВ} - Q_w. \quad (4.12)$$

Дополнительно может быть учтено влияние концентрации огнетушащего вещества на скорость выгорания пожарной нагрузки [19, 20].

При тушении распыленной водой следует принимать во внимание эффекты испарения капель, охлаждения ограждающих конструкций и соответствующую для этих условий скорость выгорания горючего материала [19, 20].

Аналогичным образом может быть учтена работа приточно-вытяжной вентиляции. Для этого следует ввести в дифференциальные уравнения дополнительные члены, связанные с расходами приточных $G_{ПР}$ и уходящих в вентиляционные проемы $G_{ВЫГ}$ газов.

Лекция 5. Численная реализация интегральной математической модели пожара в помещении

К настоящему времени известно несколько численных программных реализаций интегральной модели пожара в помещении. Из зарубежных программ могут быть отмечены разработки США, Франции, Дании, Японии, Швеции, Германии, Польши, Великобритании. Информация по зарубежным программам может быть получена из источников [9, 18, 19, 20].

Первой российской разработкой является программа INTMODEL, которая была реализована в ВИПТШ МВД России в 1995 г. [13]. Она позволяет рассчитывать только одно помещение прямоугольной формы. Площадь, занятая горючей нагрузкой, находится в центре помещения. Пожар распространяется в круговую, но учитывается размер площадки. Принимается во внимание также приточная и вытяжная вентиляция, пожаротушение углекислым газом или азотом. Учитывается газообмен через два проёма (дверь и окно).

Еще одна программа – КИС РТП (компьютерная имитационная система развития и тушения пожаров в зданиях) – разработана в Уральском институте ГПС МЧС России [9]. Она реализует классическую интегральную модель путем решения дифференциальных уравнений численными методами. В качестве объектов расчета могут быть выбраны помещения произвольной формы с любым количеством источников зажигания, несколькими различными видами горючих нагрузок (одновременно), произвольным количеством элементов приточной и вытяжной вентиляции, систем пожаротушения (водой, углекислым газом, азотом), различными пределами огнестойкости горючих и негорючих стен и перегородок. Для противопожарных систем предполагается возможность выбора одного из нескольких условий включения: при определенном задымлении (имитируется работа дымовых извещателей), температуре (тепловых извещателей), ручное включение и др. В процессе моделирования пожара можно управлять этими системами (включать-выключать вентиляцию, осуществлять пожаротушение и т. п.), а также открывать и закрывать двери и окна. В результате моделирования получаются временные зависимости параметров ОФП.

Примером практически используемого программного продукта, реализующего численное решение интегральной математической модели для совокупности связанных помещений, является разработка «СИТИС: ВИМ» компании «СИТИС» [9, 22].

В программном комплексе «СИТИС: ВИМ» реализован алгоритм численного решения [24] комбинированной модели интегральной модели пожара во взаимосвязи с моделью распространения пожара по площади. Система уравнений интегральной модели пожара (3.15)–(3.19) и, соответственно, алгоритмы её решения зависят от количества помещений и проёмов между ними. Поэтому имитационная система должна обладать функциями анализа введенной пользователем планировки здания и автоматического построения соответствующей системы балансовых уравнений. Такая адаптивность расчетной модели обеспечивается применением метода идентификации гидравлической схемы здания. Для определения газообмена между помещениями и моделирования на его основе распространения продуктов горения по зданию, изменений температуры в помещениях и других параметров в рамках интегрального подхода здание заменяется гидравлической схемой – графом, узлы которого моделируют помещения здания, а ветви – связи между ними (проёмы), через которые осуществляется газообмен. Таким образом, математическое моделирование динамики ОФП в помещениях здания осуществляется путём решения системы уравнений

газообмена и системы дифференциальных балансовых уравнений, соответствующих графу рассматриваемого здания. Такой подход позволяет решать систему балансовых уравнений в соответствии с любой введенной пользователем структурой здания без изменений кода программы.

Для решения системы уравнений принимается допущение о квазистационарности процесса: в течение некоторого малого промежутка времени dt процесс считается стационарным, и уравнения газообмена решаются для каждого помещения при определенном распределении температур, плотностей и давлений во всех помещениях здания.

Задача определения формы и площади пожара в каждый момент времени в одном или нескольких помещениях произвольной формы в «СИТИС: ВИМ» решается с применением метода имитационного моделирования. Площадь поверхности горения представляется в виде множества пикселей, каждый из которых содержит характеристики горючей нагрузки, в том числе линейную скорость распространения пламени. Развитие пожара в том или ином направлении от источника зажигания определяется вероятностью загорания каждого такого пикселя с учетом его характеристик и наличия соседних горящих пикселей. Таким образом, модель «СИТИС: ВИМ» является имитационной вероятностной моделью.

Вероятностная модель динамики развития пожара по площади позволяет моделировать не только движение фронта пламени, но и прекращение горения вследствие выгорания горючей нагрузки.

Локальные значения опасных факторов пожара на уровне рабочей зоны (высоты y) вычисляется исходя из распределения их величин по высоте помещения по эмпирической формуле [2, 13]:

$$\frac{\Phi_m - \Phi_0}{\Phi - \Phi_0} = \left[\frac{y}{2h} \exp \left(1,4 \frac{y}{2h} \right) \right]^{-1}, \quad (5.1)$$

где Φ , Φ_0 , Φ_m – локальное (на высоте рабочей зоны y), начальное и среднее значение ОФП, соответственно; y – координата рабочей зоны, отсчитываемая от поверхности пола; h – половина высоты помещения.

Эта формула является обобщением результатов экспериментальных исследований [2, 13] полей изменения параметров состояния газовой среды по высоте помещения при пожаре.

РАЗДЕЛ 3. ЗОННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Лекция 6. Основные положения зонного моделирования пожара

Распределение параметров состояния газовой среды по объему помещения, особенно в начальной стадии пожара, характеризуется большой неоднородностью (неравномерностью). С учетом этого факта предложен ряд так называемых зонных математических моделей пожара [4, 5, 9, 13, 15, 16, 21], в которых пространство внутри помещения условно разделяют на несколько характерных зон с существенно различающимися температурами и составами газовых сред. Границы этих зон по мере развития пожара не остаются неизменными и неподвижными. В течение времени геометрическая конфигурация зон меняется и сглаживается контрастное различие параметров состояния газа в этих зонах. Вообще говоря, пространство внутри помещения можно разбить на любое число зон. Наиболее распространенными подходами являются двухзонные и трехзонные способы разбиения внутреннего пространства помещения.

Процесс развития пожара можно представить следующим образом. После воспламенения горючих веществ образующиеся газообразные продукты устремляются вверх, формируя над очагом горения конвективную струю. Достигнув потолка помещения, эта струя растекается, образуя припотолочный слой задымленного газа. В течение времени толщина этого слоя увеличивается. В соответствии с этим в объеме помещения целесообразно выделить три характерные зоны (рис. 6.1): конвективную колонку над очагом пожара (зона I), припотолочный слой нагретого газа (зона II) и воздушную зону с практически неизменными в начальной стадии пожара параметрами состояния, равными своим начальным значениям (зона III).

Однако на сегодняшний день рекомендована к применению [4, 5] и получила практическое внедрение двухзонная математическая модель, имеющая несколько вариантов теоретического описания и программной реализации [9, 13, 15, 16, 21].

В двухзонной модели термогазодинамические процессы в задымленной зоне характеризуются усредненными по массе и объему значениями параметров:

T – температура среды в задымленной зоне, К;

μ – оптическая плотность дыма, Нп/м;

x_i – массовая концентрация i -того токсичного продукта горения в задымленной зоне, кг/кг;

x_k – массовая концентрация кислорода, кг/кг;

Z – высота нижней границы слоя дыма, м.

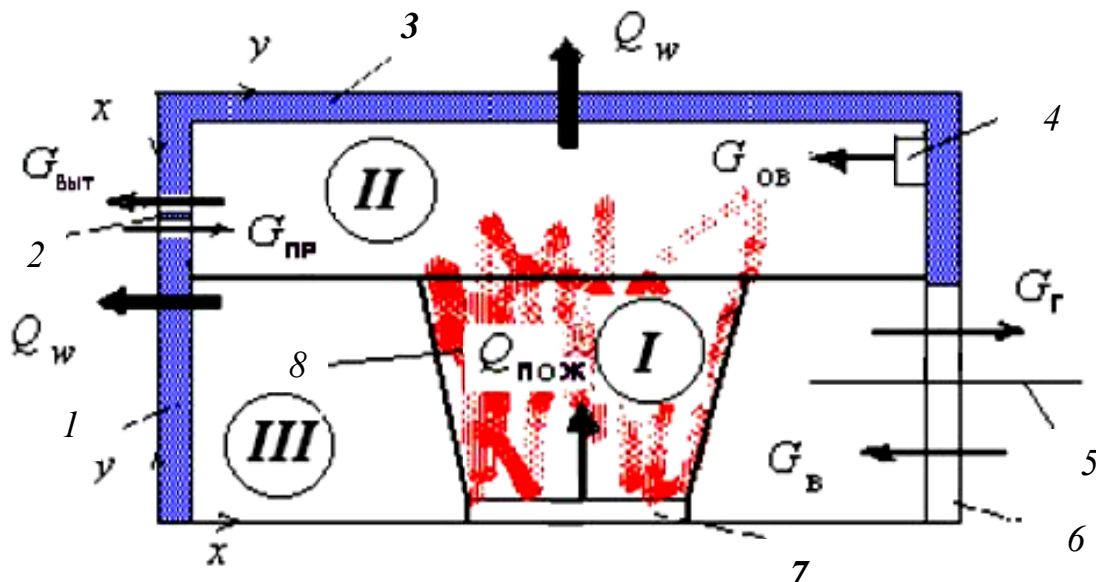


Рис. 6.1. Схема тепломассообмена при пожаре в помещении:

1 – стены; 2 – механическая приточно-вытяжная вентиляция;

3 – перекрытие; 4 – система пожаротушения; 5 – нейтральная плоскость;

6 – открытый проём; 7 – горючий материал; 8 – очаг горения

В свою очередь перечисленные параметры выражаются через основные интегральные параметры задымленной зоны с помощью следующих соотношений:

$$Q_3 = \int_0^T m \cdot c_p(T) dT, \quad (6.1)$$

$$x_i = \frac{m_i}{m}, \quad (6.2)$$

$$x_k = \frac{m_k}{m}, \quad (6.3)$$

$$\mu = \frac{s}{V_d}, \quad (6.4)$$

$$\rho = \frac{m}{V_d}, \quad (6.5)$$

$$Z = H - \frac{V_d}{A}, \quad (6.6)$$

где m , m_i – общая масса дыма и соответственно i -того токсичного продукта горения в задымленной зоне, кг; m_k – масса кислорода в задымленной зоне, кг; Q_3 – энтальпия продуктов горения в задымленной зоне, кДж; S – оптическое количество дыма, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2$; ρ – плотность дыма при температуре T , $\text{кг}/\text{м}^3$; V_d – объем задымленной зоны, м^3 ; H – высота помещения, м; A – площадь помещения, м^2 ; C_p – удельная теплоемкость дыма, $\text{кДж}/(\text{К} \cdot \text{кг})$.

Динамика основных интегральных параметров задымленной зоны определяется интегрированием системы следующих балансовых уравнений:

1) общей массы компонентов задымленной зоны с учетом дыма, вносимого в зону конвективной колонкой, и дыма, удаляемого через проемы в соседние помещения:

$$\frac{dm}{d\tau} = G_K - G_{\Pi}, \quad (6.7)$$

где τ – текущее время, с; G_K , G_{Π} – массовый расход дыма соответственно через конвективную колонку и открытые проемы в помещении, $\text{кг}/\text{с}$;

2) энтальпии компонентов задымленной зоны с учетом тепла, вносимого в зону конвективной колонкой, теплоотдачи в конструкции и уноса дыма в проемы:

$$\frac{dQ}{d\tau} = Q_K - Q_{\Pi} - Q_{\text{кон}}, \quad (6.8)$$

где Q_K , Q_{Π} , $Q_{\text{кон}}$ – тепловая мощность, соответственно, вносимая в задымленную зону конвективной колонкой, удаляемая с дымом через открытые проёмы и теряемая в конструкции, Вт;

3) массы кислорода с учетом потерь на окисление продуктов пиролиза горючих веществ:

$$\frac{dm_K}{d\tau} = 0,23(G_K - \eta\psi L_K) - x_K G_{\Pi}, \quad (6.9)$$

где η – полнота сгорания горючего материала, кг/кг; ψ – скорость выгорания горючего материала, кг/с; L_K – потребление кислорода при сгорании единицы массы горючего материала, кг/кг;

4) оптического количества дыма с учетом дымообразующей способности горящего материала:

$$\frac{dS}{d\tau} = \psi D - G_{\Pi} \frac{\mu}{\rho}, \quad (6.10)$$

где D – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м²/кг;

5) массы i -того токсичного продукта горения:

$$\frac{dm_i}{d\tau} = \psi L_i - x_i G_{\Pi}, \quad (6.11)$$

где L_i – массовый выход i -го токсичного продукта горения, кг/кг.

Масса компонентов дыма G_K , вносимых в задымлённую зону конвективной колонкой, оценивается с учетом количества воздуха, вовлекаемого в конвективную колонку по всей ее высоте до нижней границы слоя дыма. В инженерных расчетах расход компонентов дыма через осесимметричную конвективную колонку на высоте нижнего уровня задымленной зоны Z (в зависимости от того, какая область конвективной колонки или факела погружена в задымленную зону) задается полуэмпирическим соотношением [16, 21]:

$$G_K = \begin{cases} 0,011 \cdot Q \left(\frac{Z}{Q^{2/5}} \right)^{0,566} & \text{– для области факела} \\ 0,026 \cdot Q \left(\frac{Z}{Q^{2/5}} \right)^{0,909} & \text{– для переходной области,} \\ 0,124 \cdot Q \left(\frac{Z}{Q^{2/5}} \right)^{1,895} & \text{– для области колонки} \end{cases} \quad (6.12)$$

где Q – мощность очага пожара, кВт.

Динамика параметров очага пожара определяется развитием площади горения с учетом сложного состава горючих материалов, их расположения, места возникновения очага пожара и полноты сгорания:

$$Q = \eta\psi_{уд} Q_H^P F(t). \quad (6.13)$$

Тепловые и массовые потоки через проем в каждый момент времени рассчитываются с учётом текущего перепада давления по высоте проема, состава и температуры газовой среды по обе стороны проема. Так, массовый расход дыма из помещения очага пожара в соседнее помещение рассчитывается следующим образом [21]:

$$G_{\Pi} = B \cdot \xi \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} \sqrt{2\rho(P(h) - P_2(h))} dh, \quad (6.14)$$

где B – ширина проема, м; ξ – аэродинамический коэффициент проема; $P(h) - P_2(h)$ – разница давлений в помещениях на высоте h ; ρ – плотность дыма в задымленной зоне соседнего помещения при температуре дыма T .

Пределы интегрирования Y_{\max} и Y_{\min} выбираются исходя из размеров зон, для которых избыточное давление

$$\Delta P = P(h) - P_2(h) > 0.$$

Необходимая для оценки перепада давления по створу проема зависимость давления от высоты в i -ом помещении (с учетом задымленной зоны этого помещения) оценивается как

$$P_i(h) = \begin{cases} P_{i0} + \rho_0 gh, & \text{если } h \leq Z_i \\ P_{i0} + \rho_0 gZ_i + \rho_i gh, & \text{если } h > Z_i \end{cases}, \quad (6.15)$$

где P_{i0} – текущее давление в i -ом помещении на нулевой отметке (или приведенное к нулевой отметке, если уровень пола помещения выше нулевой отметки); ρ_0 – плотность воздуха при начальной температуре T_0 ; Z_i – текущая высота незадымленной зоны в i -ом помещении.

Рассчитанные параметры теплообмена в проеме используются как граничные условия для соседнего помещения.

Лекция 7. Численная реализация зонных математических моделей пожара в помещении

На сегодняшний день одной из лучших двухзонных моделей и соответствующих компьютерных программ для расчета тепломассопереноса при пожаре в помещениях зданий является комплекс CFAST (Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model – единая модель развития пожара и перемещения дыма), созданный пожарным исследовательским отделом Национального института стандартов и технологии США [15]. Модель тепломассопереноса CFAST предполагает разделение каждого расчетного помещения на два контрольных объема (зоны) – верхний (дымовой) слой и нижний слой. Дополнительными контрольными объемами в помещении с источником пожара являются дымовая и припотолочная струя. В пределах каждой зоны температурные и другие поля параметров газовой среды считаются однородными.

Уравнения математической модели CFAST отражают всю совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных процессов, присущих пожару, таких как тепловыделение в результате горения, дымовыделение в пламенной зоне, изменение оптических свойств газовой среды, выделение и распространение токсичных газов, газообмен помещений с окружающей средой и со смежными помещениями, теплообмен и нагревание ограждающих конструкций, снижение концентрации кислорода в помещении. Параметры среды в каждой зоне общие – искомые функции, независимый аргумент – время. Также искомыми функциями являются координаты, определяющие положение границ характерных зон (в первую очередь, высоту дымового слоя).

В модели CFAST уравнения сформулированы относительно следующих переменных: давление, объем дымового слоя, температура верхнего и нижнего слоев. Все процессы в модели могут быть описаны в терминах массовых и тепловых потоков: например, вентиляция есть обмен массой и энергией между зонами соседних помещений; пламя есть увеличение энергии верхнего слоя, а также передача массы и энергии из нижнего слоя в верхний; конвекция представляет собой обмен энергией между газовым слоем и окружающими стенами. Используя определения плотности, внутренней энергии и состояния идеального газа, уравнения можно формулировать различными способами, которые эквивалентны физически, но отличаются вычислительными свойствами.

Программа CFAST 6.1 [15] позволяет прогнозировать параметры продуктов горения: температуру, снижение видимости, концентрацию токсичных продуктов горения – и их распространение по зданию.

Российской компанией «СИТИС» разработана локализованная программная версия «СИТИС: Блок» [21], в которой программа CFAST 6.1 является расчетным модулем. «СИТИС: Блок» позволяет пользователю осуществлять ввод данных, затем «СИТИС: Блок» преобразует данные в формат CFAST и запускает расчетный модуль. После выполнения расчетов «СИТИС: Блок» преобразует результаты в удобный для восприятия вид и предоставляет их пользователю. Сведения об удовлетворительных для современной практики результатах валидации модели и верификации полученных расчетов по CFAST и «СИТИС: Блок 2.20» приведены в [9, 21].

Многочисленные натурные пожарные испытания подтвердили, что двухзонные модели демонстрируют достаточно достоверную картину пожара: горячие дымовые газы скапливаются под потолком, образуя дымовой слой, а параметры внутри слоя отличаются незначительно по сравнению с различием параметров между верхним и нижним слоями.

РАЗДЕЛ 4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Лекция 8. Основные положения дифференциального моделирования пожара

Как известно, пожар в помещении протекает в сложных термогазодинамических условиях при одновременном воздействии ряда возмущающих факторов:

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

Наиболее точно и подробно термогазодинамические процессы развития пожара в помещении описывают *дифференциальные (полевые)* математические модели. Их основой являются фундаментальные законы сохранения количества движения, энергии и массы, записанные для элементарных объемов, на которые разбивается рассматриваемая область пространства.

Основным достоинством дифференциальных моделей пожара является то, что искомыми параметрами выступают поля температур, скоростей, давлений, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма по всему объему помещения. Дифференциальные модели наиболее сложны в математическом описании, так как они состоят из системы трех- или двумерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных.

При выводе основных уравнений дифференциальной модели обычно принимают следующие допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины протекающих процессов:

- существует локальное термодинамическое и химическое равновесие во всем объеме помещения, что позволяет использовать равновесное уравнение состояния;
- газовая среда – смесь идеальных газов, что является вполне удовлетворительным допущением в диапазонах температур и давлений, характерных для пожара;
- локальные скорости и температуры компонентов газовой смеси и твердых (или жидких) частиц одинаковы между собой в каждой точке пространства (односкоростная и однотемпературная модель);
- химическая реакция горения является одноступенчатой и необратимой;
- диссоциация и ионизация среды при высоких температурах не учитываются;
- турбулентные пульсации не влияют на теплофизические свойства среды;
- взаимное влияние турбулентности и излучения не учитывается;
- пренебрегается обратным влиянием горения на скорость газификации горючего материала;
- термо- и бародиффузия не учитывается.

Определяющая система дифференциальных уравнений, которая описывает динамику пожара в помещении, имеет следующий вид [4, 5, 18, 19, 20, 25].

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (8.1)$$

где u – проекция вектора скорости на оси в декартовой или цилиндрической системе координат.

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad (8.2)$$

где δ_{ij} – тензор вязких напряжений (определяется из выражения, справедливого для ньютоновских жидкостей, подчиняющихся закону Стокса); g_i – ускорение свободного падения.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}, \quad (8.3)$$

где $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ – статическая энтальпия смеси; h_0 – начальное значение энтальпии смеси; $c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ – теплоемкость смеси при постоянном давлении; $c_{p,k}$ – теплоемкость k -го компонента смеси при постоянном давлении; Y_k – массовая концентрация k -го компонента смеси; H_k – теплота образования k -го компонента смеси; λ – теплота образования k -го компонента смеси; q_j^R – радиационный поток энергии в направлении x_j .

Уравнение состояния идеального газа для смеси газов:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (8.4)$$

где R_0 – универсальная газовая постоянная; M_k – молярная масса k -го компонента.

Данные уравнения описывают локальный мгновенный баланс. Их вполне достаточно для полного описания ламинарных потоков. К сожалению, при пожарах (так же, как и в большинстве других систем, связанных с горением) скорость и параметры состояния в конкретной точке совершают значительные флуктуации, а решение данных уравнений требует существенных затрат машинного времени. Поэтому обычно данные уравнения приводят к осредненным свойствам, т. е. каждую переменную разделяют на среднюю по времени величину и пульсационную составляющую этой величины.

Разложение всех переменных и их подстановка в уравнения сохранения приводят к появлению новых членов, содержащих пульсационные составляющие переменных. Даже если можно пренебречь флуктуациями плотности, например вдали от источника пожара, где горение отсутствует и турбулентный перенос массы незначителен, в уравнении сохранения импульса остаются составляющие, представляющие собой дополнительные потоки, вызванные турбулентными флуктуациями. Эти потоки обусловлены в большей степени случайным движением, чем молекулярной активностью. По величине они обычно

значительно превосходят касательные напряжения, связанные с молекулярной вязкостью. Однако такое осреднение имеет ряд недостатков при описании потоков с переменной плотностью, характерных для пожаров. Более приемлемое описание может быть получено при использовании осреднения, взвешенного по плотности [18]. При этом уравнения сохранения учитывают флуктуации плотности, что существенно при рассмотрении областей, где происходит горение.

Следует отметить, что при моделировании пожаров используется и другой подход [18], когда система (8.1)–(8.4) с помощью ряда допущений и без перехода к осредненным параметрам решается на самой мелкой сетке, которая возможна [24]. При этом удастся напрямую смоделировать поведение турбулентных вихрей, масштаб которых превышает масштаб расчетной сетки. Достоинством такого подхода является то, что в нем не используется модель турбулентности, однако он требует больших затрат машинного времени и пока не достаточно исследован.

Существенную сложность представляют собой вопросы моделирования турбулентности, моделей горения, радиационного переноса, граничных условий. С проблемами и состоянием дел по этим вопросам можно ознакомиться в специальной литературе [18, 19, 20, 24].

Лекция 9. Численная реализация дифференциальных математических моделей пожара в помещении

В качестве примера численной реализации дифференциальных моделей, которые достаточно точно описывают поля скоростей, температур и концентраций на начальной стадии пожара, можно привести такие компьютерные программы, как PHOENICS, JASMINE, SOFIE, FDS, FLUENT, CFX [9, 18, 19, 20, 23]. Вместе с тем, для проведения расчетов могут быть использованы и другие программные комплексы, апробированные на основе сравнения с экспериментальными данными.

Наиболее полной и универсальной дифференциальной моделью пожара, получившей широкое практическое применение, является математическая модель **FDS** (Fire Dynamic Simulator – «Модель динамики пожара») [9, 23]. Эта модель реализована в соответствующем программном комплексе. Разработчики FDS – Национальный институт стандартов и технологии США в международ-

ной кооперации с научно-исследовательскими организациями США, Канады и Финляндии.

Математическая модель FDS базируется на использовании дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температуры и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т. д.), давлений и плотностей газов. Решение осуществляется численным методом на основе компьютерной программы FDS.

Результатом расчета в FDS становятся поля температур, скоростей, давлений, концентраций дыма и продуктов горения и других величин.

Для программы FDS компанией «Thunderhead» разработан пользовательский графический интерфейс PyroSim [26], который упрощает ввод и анализ исходных данных, облегчает процесс построения моделирования динамики развития ОФП. Для визуализации данных расчета по FDS разработана программа Smokeview [26], которая предоставляет в наглядном виде поля температур и других параметров пожара, процесс распространения пламени и дыма.

Программы FDS и Smokeview распространяются бесплатно и имеют открытый код, который может быть свободно модифицирован любым пользователем. Программа PyroSim является коммерческим продуктом (в России локализована, предоставляется к продаже и поддерживается компанией «СИТИС» [3]).

Подробный анализ проблем развития дифференциальных моделей пожара, перспектив их использования в инженерной практике и обзор результатов численного решения с их помощью некоторых частных задач по прогнозированию ОФП содержатся в работах [9, 13, 16, 17, 18, 20, 23].

Существует ряд проблем, которые на сегодняшний день ограничивают возможности практического использования дифференциальных (полевых) моделей для достоверного прогнозирования ОФП (например, недостаточная изученность явлений турбулентности, процессов в очагах горения, радиационного теплопереноса и некоторых других вопросов термогазодинамики пожаров). Однако несмотря на перечисленные сложности в развитии и использовании дифференциальных моделей пожара, их совершенствование перспективно и успешно продолжается [9, 16, 20].

РАЗДЕЛ 5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДИНАМИКЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Лекция 10. Интегральная модель начальной стадии пожара в помещении

Использование компьютерных программ для решения практических задач прогнозирования ОФП, особенно реализующих дифференциальные математические модели, требует существенных затрат времени на освоение и настройку программы, ввод исходных данных, получение и адекватную интерпретацию результатов [9, 18, 20]. Кроме того, следует отметить, что далеко не для всех прикладных вопросов пожарно-технических задач необходима столь детальная информация о динамике пожара, которую пока лишь только в принципе могут давать, например, дифференциальные модели.

Обычно для большинства инженеров и проектировщиков использование компьютерной программы для исследования динамики ОФП и определения КПП по-прежнему является трудоемкой процедурой, особенно в связи с необходимостью выполнять анализ многофакторной задачи обеспечения безопасной эвакуации людей из помещения при возникновении пожара. В связи с этим не теряют актуальность вопросы разработки относительно простых инженерных методик определения КПП, основанных на аналитических соотношениях, позволяющих рассчитывать параметры ОФП без применения компьютерного моделирования [14, 16].

Наиболее простой в вычислительном отношении является интегральная математическая модель динамики ОФП в помещении. Но даже для неё получить аналитическое решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений, составляющих базу интегральной модели пожара в помещении, в общем случае невозможно, а для прогнозирования ОФП необходимы численное решение и разработка соответствующей компьютерной программы [13, 24].

С позиции необходимости решения задачи безопасной эвакуации людей из помещения прежде всего требуется определение так называемой критической продолжительности пожара (КПП), т. е. предельно допустимого времени эвакуации. Как отмечалось в лекции 1, КПП обычно ассоциируют с продолжительностью начальной стадии пожара [12, 13, 14, 17]. Аналитические соотношения для определения КПП могут быть получены в результате введения в ин-

тегральную математическую модель ряда допущений, принятие которых теоретически возможно на начальной стадии пожара в помещении.

Начальная стадия процесса развития пожара в помещении характеризуется целым рядом особенностей, которые существенным образом влияют на динамику ОФП. В начальной стадии пожара практически отсутствует влияние процесса снижения концентрации кислорода на выгорание горючего материала и, соответственно, на тепловыделение в очаге горения. Кроме того, если помещение имеет небольшую проёмность (т. е. отношение площади проёмов к площади ограждающих конструкций составляет величину порядка 1 % и менее), то вначале после воспламенения горючего материала в течение относительно большого промежутка времени в помещение не поступает извне свежий воздух и наблюдается только выталкивание газов из помещения через проёмы и щели [13]. Этот факт подтверждается многими экспериментами. В начальной стадии пожара при повышении средней температуры газовой среды вплоть до критических значений, при которых температура среды в рабочей зоне становится равной предельно допустимому значению $T_{\text{пд}} = 70^\circ\text{C}$, имеет место очень незначительное увеличение средней температуры поверхностей ограждающих конструкций. Эти и другие особенности процесса развития пожара позволяют существенно упростить систему дифференциальных уравнений пожара. Такая упрощённая система уравнений представляет собой так называемую *интегральную модель начальной стадии пожара*.

Итак, если ввести допущение об отсутствии поступления воздуха извне, в дифференциальных уравнениях пожара (3.15)–(3.19) можно отбросить члены, содержащие расход воздуха, так как $G_B = 0$.

Кроме того, будем рассматривать негерметичные помещения, в которых среднее давление среды остается практически постоянным, равным давлению наружного воздуха, так что с достаточной точностью можно принять:

$$\frac{dp_m}{d\tau} \cong 0; \quad (10.1)$$

$$\rho_m T_m = \rho_0 T_0, \quad (10.2)$$

где ρ_0 , T_0 – плотность и температура среды перед началом пожара; ρ_m , T_m – соответственно, средние значения плотности и температуры среды в рассматриваемый момент времени; p_m – среднее давление в помещении.

Интервал времени, в течение которого наблюдается односторонний газообмен, является относительно небольшим. Средняя температура и концентрация кислорода в помещении изменяются за этот промежуток времени незначительно. Поэтому можно принять, что величины η , D , R в этой стадии пожара остаются неизменными. Кроме того, принимается, что $n_1 = n_2 = n_3 = m = 1$; $V = const$; $c_p = c_{pв} = const$.

С учетом принятых допущений уравнения пожара для начальной стадии пожара в помещении с малой проемностью принимают следующий вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi - G_\Gamma; \quad (10.3)$$

$$\psi Q_H^p \eta - c_p T_m G_\Gamma - Q_w = 0; \quad (10.4)$$

$$V \frac{d\rho_1}{d\tau} = -\psi L_1 \eta - \frac{\rho_1}{\rho_m} G_\Gamma; \quad (10.5)$$

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \psi L_2 \eta - \frac{\rho_2}{\rho_m} G_\Gamma; \quad (10.6)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi D - \mu_m \frac{1}{\rho_m} G_\Gamma. \quad (10.7)$$

Далее принимается допущение о том, что отношение теплового потока в ограждения к тепловыделению есть величина постоянная, равная своему среднему значению на этом интервале, т. е.

$$\frac{1}{\tau_*} \int_0^{\tau_*} \frac{Q_w}{Q_{\text{пож}}} d\tau = \varphi, \quad (10.8)$$

где $Q_{\text{пож}} = \psi \eta Q_H^p$; τ_* – время окончания начальной стадии пожара.

Величину φ принято называть «коэффициентом теплопотерь» [2], или «коэффициентом теплопоглощения» [13].

Уравнение энергии (10.4) при использовании соотношения (10.8) преобразуется к виду

$$\psi Q_H^p \eta (1 - \varphi) - c_p T_m G_\Gamma = 0. \quad (10.9)$$

Из (10.9) получается формула для вычисления расхода выталкиваемых газов в каждый момент времени:

$$G_{\Gamma} = \frac{\psi Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p T_m}. \quad (10.10)$$

С учетом выражения (10.10) уравнения (10.3), (10.5), (10.6) и (10.7) преобразуются к виду

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi \left[1 - \frac{Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m \right]; \quad (10.11)$$

$$V \frac{d\rho_1}{d\tau} = -\psi L_1 \eta \left[1 + \frac{Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 L_1} \rho_1 \right]; \quad (10.12)$$

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \psi L_2 \eta \left[1 - \frac{Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 L_2} \rho_2 \right]; \quad (10.13)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi D - \left[1 - \frac{Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 D} \mu_m \right]. \quad (10.14)$$

Данные уравнения представляют собой частный случай основной (неупрощенной) системы уравнений пожара. При этом каждое дифференциальное уравнение является уравнением с разделяющимися переменными.

Уравнение (10.11) можно еще более упростить, если учесть, что для подавляющего большинства горючих материалов величина $Q_H^p = 10^7$ Дж·кг⁻¹, теплоемкость газовой среды в помещении $c_p = 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, произведение начальных значений плотности и температуры $\rho_0 T_0 \approx 300$ кг·К·м⁻³, коэффициент полноты горения $\eta \approx 1$, величина коэффициента теплопотерь $\varphi = 0,25 - 0,6$ [2, 4, 5, 13]. Тогда второй член в прямоугольных скобках этого уравнения во много раз больше единицы, т. е.

$$\frac{Q_H^p \eta (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m \gg 1. \quad (10.15)$$

В связи с этим в прямоугольных скобках уравнения (10.11) можно отбросить единицу и уравнение (10.11) примет следующий вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = -\psi \frac{Q_H^p \eta(1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m. \quad (10.16)$$

Разделим переменные и затем проинтегрируем правую и левую части уравнения (10.11), используя при этом указанное ранее начальное условие:

$$\int_{\rho_0}^{\rho_m} \frac{d\rho_m}{\rho_m} = -\frac{Q_H^p \eta(1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \int_0^\tau \psi d\tau. \quad (10.17)$$

Интеграл в правой части уравнения (10.17) есть масса горючего материала (ГМ), сгоревшего к моменту времени τ , т. е.

$$\int_0^\tau \psi d\tau = M_\tau, \quad (10.18)$$

где M_τ – масса сгоревшего ГМ, кг.

Например, если процесс распространения пожара по поверхности твердого ГМ (ТГМ) является круговым, то функция ψ имеет следующий вид:

$$\psi = \psi_{уд} \pi v_{л}^2 \tau^2, \quad (10.19)$$

где $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $v_{л}$ – линейная скорость распространения пламени по площади размещения пожарной нагрузки, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Подставляя формулу (10.19) в подынтегральное выражение формулы (10.18), получим

$$M_\tau = \frac{\pi}{3} \cdot \psi_{уд} \cdot v_{л}^2 \cdot \tau^3 = 1,05 \cdot \psi_{уд} \cdot v_{л}^2 \cdot \tau^3. \quad (10.20)$$

Если процесс распространения пожара по поверхности ТГМ является линейным, то функция ψ имеет следующий вид:

$$\psi = k \cdot \psi_{уд} \cdot v_l \cdot b_{\Gamma} \cdot \tau. \quad (10.21)$$

где b_{Γ} – ширина фронта пламени, м; k – число направлений распространения пламени (при распространении пламени в одну сторону $k = 1$, в направлениях, противоположных друг другу, $k = 2$).

Подставляя формулу (10.21) в выражение (10.18), получаем:

$$M_{\tau} = \frac{k}{2} \cdot \psi_{уд} \cdot v_l \cdot b_{\Gamma} \cdot \tau^2. \quad (10.22)$$

При горении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей с установившейся скоростью (характерно для легкоиспаряющихся жидкостей), разлитых на площади F , функция ψ имеет следующий вид:

$$\psi = \psi_{уд} \cdot F, \quad (10.23)$$

где F – площадь открытой поверхности жидкости, m^2 .

Тогда формула для вычисления сгоревшей массы жидкости примет вид

$$M_{\tau} = \psi_{уд} \cdot F \cdot \tau. \quad (10.24)$$

Все представленные формулы для расчета массы выгоревшего ГМ можно выразить одной формулой:

$$M_{\tau} = A \cdot \tau^n, \quad (10.25)$$

$$\text{где } A = \begin{cases} \frac{\pi}{3} \cdot \psi_{уд} \cdot v_l^2 & \text{— при круговом распространении пожара по ТГМ} \\ \frac{k}{2} \cdot \psi_{уд} \cdot v_l \cdot b_{\Gamma} & \text{— при линейном распространении пожара по ТГМ;} \\ \psi_{уд} \cdot F & \text{— при установившемся горении ГЖ} \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 3 & \text{— при круговом распространении пожара по ТГМ} \\ 2 & \text{— при линейном распространении пожара по ТГМ.} \\ 1 & \text{— при установившемся горении ГЖ} \end{cases}$$

Подставляя формулу (10.25) в уравнение (10.17), после интегрирования левой части этого уравнения получим следующее выражение:

$$\ln \frac{\rho_m}{\rho_0} = -\frac{A}{B} \tau^n, \quad (10.26)$$

$$\text{где } B = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot V}{(1-\varphi) \cdot \eta \cdot Q_H^p}. \quad (10.27)$$

Потенцируя выражение (10.26), получим следующую формулу, описывающую зависимость средней плотности от времени:

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = \exp \left(-\frac{A}{B} \tau^n \right). \quad (10.28)$$

Из этой формулы с учетом соотношения (10.2) получается формула, описывающая процесс нарастания средней температуры среды в помещении:

$$\frac{T_m}{T_0} = \exp \left(\frac{A}{B} \tau^n \right). \quad (10.29)$$

Перейдем к решению дифференциального уравнения (10.5), описывающего процесс снижения парциальной плотности кислорода в помещении. Разделим переменные и далее проинтегрируем правую и левую части полученного уравнения с разделяющимися переменными, учитывая при этом ранее указанные начальные условия:

$$\int_{\rho_{01}}^{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\left[1 + \frac{(1-\varphi) \cdot Q_H^p}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot L_1} \right]} = -\frac{\eta L_1}{V} \int_0^\tau \psi d\tau, \quad (10.30)$$

где ρ_{01} – начальное значение плотности кислорода в помещении (в [2] принимается, что $\rho_0 = 0,27 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а отношение $\frac{\rho_{01}}{\rho_0} = 0,23$).

После интегрирования правой и левой частей уравнения (10.30) с учетом формулы (10.18) получается выражение:

$$\ln \left[\frac{1 + \frac{(1-\varphi) \cdot Q_H^p}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot L_1} \rho_1}{1 + \frac{(1-\varphi) \cdot Q_H^p}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot L_1} \rho_{01}} \right] = -\frac{(1-\varphi) \cdot \eta \cdot Q_H^p}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot V} \cdot A \cdot \tau^n. \quad (10.31)$$

Потенцируя выражение (10.31), получим формулу, описывающую зависимость парциальной плотности токсичного газа от времени:

$$\frac{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_1} \rho_1}{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_1} \rho_{01}} = \exp \left[-\frac{A}{B} \tau^n \right]. \quad (10.32)$$

Эту формулу можно преобразовать к виду

$$\rho_1 = \frac{B \cdot \eta \cdot L_1}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_1} \rho_{01} \right) \exp \left[-\frac{A}{B} \tau^n \right] - 1 \right\}. \quad (10.33)$$

Перейдем к рассмотрению дифференциального уравнения (10.6), описывающего процесс изменения во времени концентрации токсичного газа в помещении. После разделения переменных и интегрирования с учетом начального условия получим следующее выражение:

$$\ln \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_*} \right) = -\frac{A}{B} \tau^n, \quad (10.34)$$

где $\rho_* = \frac{T_0 \cdot c_p \cdot L_2}{(1-\varphi) \cdot Q_H^p} \rho_0$ – так называемая «пороговая» парциальная плотность токсичного газа, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ [13].

Потенцируя выражение (10.34), получим формулу, описывающую зависимость средней парциальной плотности кислорода от времени:

$$\rho_2 = \rho_* \left[1 - \exp \left(-\frac{A}{B} \tau^n \right) \right]. \quad (10.35)$$

Рассмотрим дифференциальное уравнение (10.7), описывающее изменение критической плотности дыма в помещении. Разделим переменные в этом уравнении и затем, проинтегрировав с учетом начального условия, получим следующую формулу:

$$\mu = \mu_* \left[1 - \exp \left(-\frac{A}{B} \tau^n \right) \right], \quad (10.36)$$

$$\text{где } \mu_* = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot c_p \cdot D}{\eta(1-\varphi) \cdot Q_H^p}. \quad (10.37)$$

Отметим, что значение μ_* зависит от свойств ГМ.

Итак, в результате решения дифференциальных уравнений (10.3)–(10.7) получены формулы, позволяющие рассчитывать процессы нарастания ОФП. В соответствии с принятыми выше допущениями эти формулы имеют ограниченный характер и применимы лишь до тех пор, пока отсутствует поступление воздуха в помещение. В работе [29] показано, что это условие соблюдается, если выполняется следующее неравенство:

$$\frac{F_{\text{пр}}\sqrt{gH}}{V}\tau \leq 5, \quad (10.38)$$

где $F_{\text{пр}}$ – суммарная площадь открытых проемов, м^2 ; $g = 9,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ – ускорение свободного падения; H – высота проемов, м ; V – объем помещения, м^3 .

Полученные формулы (10.29), (10.33), (10.35) и (10.36) позволяют рассчитать критическую продолжительность пожара в помещениях, имеющих небольшие открытые в начальной стадии проемы.

Лекция 11. Аналитические соотношения для расчета критической продолжительности пожара в помещении

Отметим еще раз, что критическая продолжительность пожара есть время достижения предельно допустимых для человека значений ОФП в зоне пребывания людей. С развитием пожара изменяется состояние среды, заполняющей помещение, а следовательно, изменяются средние и локальные значения параметров состояния – температура, концентрация кислорода и токсичных газов, дальность видимости.

Предельно допустимые значения параметров состояния в зоне пребывания людей (т. е. предельно допустимые локальные значения этих параметров) соответствуют некоторому состоянию среды в помещении, характеризующему определенными значениями средних параметров состояния (средними критическими параметрами состояния). При этом, например, если средняя температура среды достигла своего критического значения, то это значит, что в рабочей зоне температура газа достигла своего предельно допустимого значения. Для определения зависимости локальных значений параметров среды от их среднеобъемных значений предложено несколько эмпирических формул [13], из которых на практике чаще всего используется формула (5.1) (см. лекцию 5).

Подчеркнем, что эта формула получена для помещений, высота которых не превышает 6 м [2, 13].

Подставив в формулу (10.29) критическое значение средней температуры газовой среды в помещении, получим формулу для расчета критической продолжительности пожара по условию достижения средней температурой критического значения:

$$\tau_{\text{кр}}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} \right] \right\}^{1/n}. \quad (11.1)$$

Подставив в формулу (10.33) критическое значение средней парциальной плотности кислорода, получим формулу для расчета КПП по условию достижения средней концентрацией кислорода критического значения:

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\frac{\frac{B \cdot L_1 \eta}{V} + \rho_{01}}{\left(\frac{B \cdot L_1 \eta}{V} + \rho_{1\text{кр}} \right)} \right] \right\}^{1/n}. \quad (11.2)$$

Подставив в формулу (10.35) критическое значение средней парциальной плотности токсичного газа, получим формулу для расчета КПП по условию достижения средней концентрацией токсичного газа критического значения:

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{ТГ}} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{(1-\varphi) \cdot Q_H^p}{c_p \rho_0 T_0 L_2 \rho_{2\text{кр}}}} \right] \right\}^{1/n}. \quad (11.3)$$

Подставив в формулу (10.36) критическое значение средней оптической плотности дыма, получим формулу для расчета КПП по условию достижения средней оптической плотностью критического значения:

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{дым}} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\eta(1-\varphi) \cdot Q_H^p}{c_p \rho_0 T_0 D \mu_{\text{кр}}}} \right] \right\}^{1/n}. \quad (11.4)$$

Оптическая плотность дыма связана с дальностью видимости соотношением (3.13).

С учетом формулы (5.1) и величин предельно допустимых для человека значений параметров ОФП (лекция 1) выражения (11.1)–(11.4) представляются в следующем виде [4, 5]:

$$\tau_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 + \frac{70-t_0}{(273+t_0) \cdot Z} \right] \right\}^{1/n}; \quad (11.5)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \cdot L_1}{V_{св}} + 0,27 \right) \cdot Z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (11.6)$$

$$\tau_{кр}^{ТГ} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L_2 \cdot Z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (11.7)$$

$$\tau_{кр}^{дым} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{20 \cdot B \cdot D \cdot Z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}, \quad (11.8)$$

где, кроме ранее указанных обозначений, X – предельно допустимое содержание рассматриваемого токсичного газа в атмосфере помещения, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (в частности, для наиболее часто учитываемых газов $X_{\text{CO}_2} = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $X_{\text{CO}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $X_{\text{HCl}} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ [13]; α – коэффициент отражения (альбедо) предметов на путях эвакуации; E – начальная освещенность путей эвакуации, лк; Z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения [13]:

$$Z = \frac{h}{H} \cdot \exp \left(1,4 \cdot \frac{h}{H} \right), \text{ при } H \leq 6 \text{ м}; \quad (11.9)$$

где h – высота рабочей зоны, м; H – высота помещения, м.

В работе [12] для условий воспламенения горючих жидкостей (ГЖ) представлены более точные аналитические методы расчёта КПП, в которых по сравнению с изложенным выше решением было снято наиболее существенное

допущение о том, что отношение теплового потока в ограждения к скорости тепловыделения в очаге горения есть величина постоянная в течение всего интервала времени, равного КПП ($\varphi = const$).

Далее рассматриваются процессы нарастания ОФП в помещении при постоянной скорости тепловыделения в очаге горения ГЖ. Такой очаг реализуется при выгорании горючих жидкостей, если площадь горения не изменяется со временем и стабилизация процесса выгорания ГЖ происходит за короткий промежуток времени, т. е. практически мгновенно. Другим примером такого очага горения может служить воспламенившаяся струя газа из трубопровода (или какого-либо технического устройства) с постоянным массовым расходом. При таком очаге горения остаются неизменными во времени скорости потребления кислорода (т. е. количество кислорода, потребляемого очагом горения за единицу времени), скорость выделения токсичных газов (количество токсичного продукта, генерируемого в очаге горения за единицу времени) и скорость дымовыделения (оптическое количество дыма, образующегося за единицу времени).

Среднеобъёмные значения параметров состояния газовой среды в начальной стадии пожара в помещении с малой проёмностью (при выполнении условий (10.1, 10.2)) описываются системой уравнений (10.3)–(10.7).

Тепловой поток Q_w , поступающий в ограждения, обусловлен процессами конвективного и лучистого теплообмена. В начальной стадии пожара газовая среда, заполняющая пространство между факелом пламени (пламенной зоной) и ограждениями (стены, потолок, пол), является прозрачной для тепловых лучистых потоков, испускаемых факелом пламени [29]. Интегральные оптические характеристики этой среды в начальной стадии пожара позволяют считать её оптически прозрачной. Это даёт возможность рассматривать конвективную и лучистую составляющие сложного теплообмена отдельно, а при определении суммарного теплового потока в ограждения использовать закон аддитивности т. е.

$$Q_w = Q_R + Q_K, \quad (11.10)$$

где Q_R – лучистый (радиационный) тепловой поток от факела пламени в ограждения, Вт; Q_K – конвективный тепловой поток от газовой среды в ограждающие конструкции, Вт.

В [10] указано, что радиационный тепловой поток, исходящий от факела пламени (пламенной зоны) в окружающую среду, для большинства ГЖ может составлять приблизительно 30 % от выделяемой тепловой энергии в очаге горения. В [18] отмечается, что из пламенной зоны сгорающего в воздухе метана излучается от 20 до 30 % тепловой энергии, выработанной в результате химических превращений (окисления). При горении нефтепродуктов эта доля может составлять 50 %.

Факелом пламени (ФП) обычно называют светящуюся (видимую) зону пространства, границей которой является изотермическая поверхность с температурой $T_{\phi} = 823\text{--}873\text{ К}$ [10].

Количество теплоты, передаваемой за счёт излучения от ФП в окружающие его со всех сторон строительные конструкции, может быть определено на основе известной физической модели лучистого теплообмена между двумя серыми телами, одно из которых заключено внутри другого, а пространство между этими телами заполнено оптически прозрачной средой [30]:

$$Q_R = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\phi}, \quad (11.11)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты для указанной системы двух тел; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; T_{ϕ} – температура ФП, К; T_w – температура поверхности ограждений, К; F_{ϕ} – площадь поверхности ФП, м^2 ;

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_{\phi}} + \frac{F_{\phi}}{F_w} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (11.12)$$

где ε_{ϕ} – степень черноты ФП; ε_w – степень черноты поверхности ограждений; F_w – суммарная площадь поверхностей ограждений (стены + потолок + пол), м^2 .

Отметим, что при решении вопросов, связанных с обеспечением безопасной эвакуации людей из помещения в случае возникновения пожара (таких, как определение расчётного времени эвакуации, конструктивно-планировочные решения эвакуационных путей и выходов, необходимое время эвакуации) априори предполагается, что площадь поверхности воспламенившейся ГЖ много меньше площади пола. В тех случаях, когда площадь горения соизмерима с

площадью пола, вопрос о безопасной эвакуации людей становится бессмысленным. В этой связи в дальнейшем рассматриваются пожары, которые могут возникнуть при условии, что площадь поверхности воспламенившейся ГЖ значительно меньше площади пола помещения (т. е. *локальные* пожары). При таких пожарах площадь поверхности ФП много меньше площади суммарной поверхности ограждающих конструкций, т. е.

$$\frac{F_{\Phi}}{F_w} \ll 1. \quad (11.13)$$

В начальной (докритической) стадии пожара температура поверхности ограждений мало отличается от своего начального значения. Поэтому может быть принято следующее условие:

$$\left(\frac{T_w}{100}\right)^4 \ll \left(\frac{T_{\Phi}}{100}\right)^4. \quad (11.14)$$

При условиях (11.13) и (11.14) формулы (11.11) и (11.12) упрощаются. Формула (11.11) принимает вид

$$Q_R = \varepsilon_{\Phi} \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_{\Phi}}{100}\right)^4 \cdot F_{\Phi}, \quad (11.15)$$

где $C_0 = 5,75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Чтобы воспользоваться формулой (11.15), необходимо знать площадь поверхности ФП. Размеры ФП зависят от величины площади горения. Согласно экспериментальным данным [14] усреднённая форма (конфигурация) турбулентного диффузионного ФП описывается полиномом пятой степени. Для определения площади поверхности ФП можно воспользоваться геометрической схематизацией ФП, в частности цилиндрической моделью ФП. Цилиндрическая модель ФП наилучшим образом согласуется с экспериментальными наблюдениями [14]. Согласно этой модели в тех случаях, когда поверхность воспламенившейся ГЖ близка к кругу, ФП рассматривается как цилиндрическое тело с диаметром, равным эквивалентному диаметру очага горения. Если очаг горения

является по форме вытянутым прямоугольником, то ФП рассматривается как прямоугольный параллелепипед (частный случай цилиндра).

Следует отметить, что лучистый тепловой поток в ограждающие конструкции испускается как с боковой поверхности цилиндрической модели, так и с поверхности её верхнего основания. Лучистый тепловой поток, испускаемый с поверхности нижнего основания цилиндра, расходуется на испарение ГЖ. Это обстоятельство можно учесть в структуре уравнения энергии (10.4), если предположить, что

$$Q'_R = \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} \cdot r \approx \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} \cdot i_{\Pi}, \quad (11.16)$$

где Q'_R – лучистый тепловой поток с поверхности нижнего основания цилиндра; r – теплота парообразования ГЖ; i_{Π} – энтальпия продуктов испарения.

С учетом вышесказанного лучеиспускающая поверхность в формуле (11.15) определяется следующим образом:

$$F_{\Phi} = P \cdot h_{\Phi} + F_{\Gamma}, \quad (11.17)$$

где P – периметр очага горения, м; h_{Φ} – высота ФП, м; F_{Γ} – площадь очага горения, м^2 .

В случае, когда очаг горения по форме близок к кругу, формула (11.17) преобразуется к следующему виду:

$$F_{\Phi} = F_{\Gamma} \left(1 + 4 \cdot \frac{h_{\Phi}}{d_3} \right), \quad (11.18)$$

где $F_{\Gamma} = \frac{\pi d_3^2}{4}$ – площадь очага горения, м^2 ; d_3 – эквивалентный диаметр очага горения, м.

Исследованию высоты ФП посвящено большое число экспериментальных работ. В результате обобщения данных этих исследований получена следующая формула для определения относительной высоты ФП [10]:

$$\frac{h_{\Phi}}{d_3} = 0,23 \cdot \left(\frac{\eta \cdot \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} \cdot Q_H^p}{1000} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \frac{1}{d_3} - 1,02, \quad (11.19)$$

где Q_H^p – теплота сгорания ГЖ, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$; $\eta = 0,9$ – коэффициент полноты горения.

Из формулы (11.19) следует, что высота ФП зависит от удельной массовой скорости выгорания ГЖ. В свою очередь удельная массовая скорость выгорания каждой ГЖ зависит от эквивалентного диаметра очага горения [10]. Эта зависимость наблюдается при малых значениях эквивалентного диаметра очага горения в диапазоне $0,1 \text{ м} < d_3 < 1 \text{ м}$. При значениях $d_3 > 1 \text{ м}$ скорость выгорания всех ГЖ почти не зависит от диаметра очага горения.

Одним из ключевых вопросов при использовании вышеописанной модели ФП является вопрос о величине степени черноты ФП (или коэффициента излучения $C_\phi = \varepsilon_\phi \cdot C_0$). ФП представляет собой высокотемпературную смесь газов, а излучение ФП носит объёмный характер. Распределение температуры внутри ФП является неоднородным. В центральной части ФП температура газов достигает максимальных значений и составляет, например при горении бензина – 1370 К, при горении мазута – 1330 К [29]. При этом излучение от высокотемпературных областей ФП, направленное во внешнее пространство через границу ФП, ослабляется в силу того, что ФП представляет собой поглощающую и рассеивающую газовую среду. Оптические свойства этой среды различны в разных точках ФП, поскольку коэффициент ослабления среды зависит от локального значения температуры. Экспериментальные исследования степени черноты ФП при горении всех нефтепродуктов и многих ГЖ показали, что можно принять $\varepsilon_\phi \sim 0,8\text{--}0,85$ [14].

Из формулы (11.15) следует, что радиационный тепловой поток от ФП к ограждениям в начальной (докритической) стадии пожара не зависит от среднеобъёмной температуры среды, заполняющей пространство между ФП и ограждениями. Эта часть тепловой энергии, выделяемой в очаге горения, практически не участвует в процессе нагревания среды, заполняющей всё помещение. Доля этой тепловой энергии, представляющая собой отношение лучистого теплового потока Q_R к скорости тепловыделения в очаге горения Q_n , определяется по следующей формуле:

$$\beta = \frac{Q_R}{Q_n} = \frac{\varepsilon_\phi \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_\phi}{100}\right)^4}{\eta \cdot \psi_{уд} \cdot Q_H^p} \left(1 + 4 \cdot \frac{h_\phi}{d_3}\right). \quad (11.20)$$

При расчётах конвективного теплового потока в начальной стадии пожара можно принять, что

$$\frac{T_m - T_w}{T_m - T_0} = \xi = \text{const.} \quad (11.21)$$

В интервале времени ($0 < \tau < \tau_{кр}$) среднее значение отношения температурных разностей, содержащихся в условии (11.21), составляет величину $\xi = 0,93 \div 0,95$.

Суммарный конвективный тепловой поток в ограждения определяется путём суммирования тепловых потоков в ограждения и может быть определен по следующей эмпирической зависимости [12]:

$$Q_k = \alpha_* \cdot (T_m - T_0)^{4/3} \cdot F_w, \quad (11.22)$$

где $\alpha_* = 1,74 \cdot \xi^{4/3}$, Вт·м⁻²·К^{-4/3}.

В результате преобразования уравнения энергии газовой среды в помещении (10.4) в работе [12] получено следующее выражение, описывающее зависимость температуры среды от времени:

$$\frac{\gamma_0}{1 + \gamma_0 \cdot \vartheta^{1/3}} \cdot \ln\left(\frac{1 + \vartheta}{1 - \gamma_0 \cdot \vartheta^{4/3}}\right) = \alpha_0 \tau, \quad (11.23)$$

$$\text{где } \vartheta = \frac{T_m - T_0}{T_0}; \quad (11.24)$$

$$\gamma_0 = \frac{\alpha_* \cdot F_w \cdot T_0^{4/3}}{\eta \cdot \psi_{уд} \cdot Q_H^p \cdot F_{\Gamma}(1 - \beta)}; \quad (11.25)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_* \cdot F_w \cdot T_0^{4/3}}{c_p \rho_0 T_0 V}; \quad (11.26)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_{\Phi} \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_{\Phi}}{100}\right)^4}{\eta \cdot \psi_{уд} \cdot Q_H^p} \left(1 + 4 \cdot \frac{h_{\Phi}}{d_3}\right). \quad (11.27)$$

Безразмерная величина ϑ (11.24) представляет собой относительное значение приращения температуры среды. Величина γ_0 – обобщенный параметр задачи. Этот параметр является безразмерным комплексом, составленным из заданных (известных) величин – $F_w, T_0, \eta, \psi_{y0}, F_L, Q_H^p, \varepsilon_\phi, T_\phi, d_\varepsilon$. Безразмерный комплекс $\alpha_0\tau$ представляет собой обобщенное (безразмерное) время. Он включает, помимо времени τ , заданные (известные) величины – F_w, T_0, c_p, ρ_0, V .

Из формулы (11.23) следует, что относительное приращение температуры среды зависит от $\alpha_0\tau$ и параметра γ_0 , т. е.

$$\vartheta = f(\alpha_0\tau, \gamma_0).$$

Формулу для расчёта КПП при условии достижения температурой среды в рабочей зоне предельно допустимого значения можно представить в следующем виде:

$$\tau_{кр}^T = A \cdot \ln B, \quad (11.28)$$

$$\text{где } A = \frac{\gamma_0}{\alpha_0(1+\gamma_0 \cdot \vartheta_{кр}^{1/3})}, \quad (11.29)$$

$$B = \frac{1 + \vartheta_{кр}}{1 - \gamma_0 \cdot \vartheta_{кр}^{4/3}}, \quad (11.30)$$

$$\vartheta_{кр} = \frac{T_{кр} - T_0}{T_0} = \frac{T_{п.д} - T_0}{T_0 \cdot z}, \quad (11.31)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_* \cdot F_w \cdot T_0^{4/3}}{c_p \rho_0 T_0 V} = \frac{\alpha_* \cdot T_0^{4/3}}{c_p \rho_0 T_0 V^{1/3}} \cdot \Phi, \quad (11.32)$$

$\Phi = \frac{F_w}{V^{2/3}}$ – критерий формы помещения; $\tau_{кр}^T$ – КПП по условию достижения температурой среды критического значения.

Формула (11.28) применима (имеет физический смысл) лишь при условии, что $\gamma_0 \cdot \vartheta_{кр}^{4/3} < 1$. При $\gamma_0 \cdot \vartheta_{кр}^{4/3} > 1$ выражение под знаком логарифма становится отрицательным. Это говорит о том, что температура среды в данном случае вообще не может достигать критического значения.

Полученная формула для расчёта КПП позволяет определить *предельную массу* ГЖ. Под предельной массой ГЖ следует понимать такое количество ГЖ, при сгорании которой температура среды достигнет критического значения, но и в дальнейшем не превысит этого значения. При меньших количествах ГЖ температура среды в помещении вообще может не достигнуть своего критического значения. Предельное количество ГЖ представляет интерес при оценке уровня опасности различных производств и при исследовании произошедших пожаров.

Предельное количество ГЖ определяется из условия, согласно которому предполагается, что по истечении времени, равного $\tau_{кр}^T$, полностью выгорит весь запас ГЖ, т. е.

$$M_{пред} = \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} \cdot A \cdot \ln B. \quad (11.33)$$

В работе [12] также получены аналитические соотношения, описывающие зависимости оптической плотности дыма, концентраций кислорода и токсичных газов от времени при горении ГЖ в помещении.

Формула для определения текущей концентрации кислорода:

$$x_1 = x_{01} - \frac{c_p \cdot \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} (x_{01} + \eta L_1)}{\alpha_* (T_{кр} - T_0)^{1/3} \cdot F_w} \cdot \ln \left\{ \frac{1 + \gamma b \exp[(1 + \gamma b) \alpha \tau]}{1 + \gamma b} \right\}, \quad (11.34)$$

$$\text{где } b = \frac{T_0}{T_{кр} - T_0}; \quad (11.35)$$

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \left(\frac{T_{кр} - T_0}{T_0} \right)^{4/3} = \gamma_0 \cdot \vartheta_{кр}^{4/3}. \quad (11.36)$$

Формула для определения текущей концентрации токсичного газа:

$$x_2 = \eta L_2 \left\langle 1 - \left\{ \frac{1 + \gamma b}{1 + \gamma b \exp[(1 + \gamma b) \alpha \tau]} \right\}^{B_1} \right\rangle, \quad (11.37)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{\psi_{уд} \cdot F_{\Gamma}}{\rho_0 V \alpha \gamma b} = \frac{c_p \cdot \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma}}{\alpha_* (T_{кр} - T_0)^{1/3} \cdot F_w}; \quad (11.38)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{\gamma_0}. \quad (11.39)$$

Значение парциальной плотности токсичного газа в каждый момент времени определяется по формуле

$$\rho_2 = x_2 \cdot \rho_m = x_2 \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_m}. \quad (11.40)$$

Формула для определения текущей величины оптической плотности дыма:

$$\mu_m = \rho_0 DB_1 \cdot \left\{ \ln \frac{1+\gamma b \exp[(1+\gamma b)\alpha\tau]}{1+\gamma b} \right\} \cdot \frac{\gamma b + \exp[-(1+\gamma b)\alpha\tau]}{1+\gamma b}. \quad (11.41)$$

В работе [12] также выполнена модификация математической модели начальной стадии пожара, учитывающая изменение скорости выгорания ГЖ со временем.

РАЗДЕЛ 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Лекция 12. Порядок определения времени блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара в помещении

Обязательным этапом разработки эффективных и экономически оптимальных противопожарных мероприятий, направленных на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, создания и совершенствования систем пожарной сигнализации и автоматических систем пожаротушения, разработки оперативных планов тушения пожара является оценка величин *пожарного риска*, которая выполняется в соответствии с требованиями нормативных документов [1–5]. Ключевой параметр при расчете величины пожарного риска – время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них ОФП, имеющих предельно допустимые для людей значения (так называемое время блокирования эвакуационных путей) [4, 5].

Определение времени блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара в помещении осуществляется в следующем порядке [4, 5].

Вначале производится сбор исходных данных, который включает выбор численных значений параметров, входящих в математическую модель. Для этого осуществляется анализ объемно-планировочных и конструктивных решений объекта, размещения, вида и количества горючей нагрузки. По объемно-планировочным и конструктивным решениям определяются геометрические характеристики задачи.

Из анализа объемно-планировочных решений, назначения и характеристик помещения, а также размещения, вида и количества типовой горючей нагрузки находятся следующие теплофизические и химические свойства, а также другие характеристики горючей нагрузки:

- низшая рабочая теплота сгорания;
- удельная скорость выгорания;
- количество кислорода, потребляемого при горении;
- удельное дымовыделение;
- удельное выделение каждого токсичного газа;
- скорость распространения пламени (в случае твердого горючего материала);

- время стабилизации горения (в случае горючей жидкости);
- суммарная масса горючей нагрузки.

Задаются начальные условия:

- температура газовой среды помещения перед пожаром;
- температура наружного воздуха;
- давление в газовой среде помещения перед пожаром;
- давление в наружном воздухе на уровне пола помещения.

В качестве физических условий задаются:

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

Далее производится экспертный выбор сценария или сценариев пожара, при которых ожидаются наихудшие последствия для находящихся в здании людей.

Разработка сценария развития пожара включает следующие этапы:

- 1) выбор места нахождения первоначального очага пожара и закономерностей его развития;
- 2) задание расчетной области (выбор рассматриваемой при расчете системы помещений, определение учитываемых при расчете элементов внутренней структуры помещений, задание состояния проемов);

Выбор места нахождения очага пожара производится экспертным путем. При этом учитываются количество горючей нагрузки, ее свойства и расположение, вероятность возникновения и возможная динамика развития пожара, расположение эвакуационных путей и выходов.

Выбор конкретной математической модели для описания термогазодинамических параметров пожара следует осуществлять согласно [4, 5] исходя из нижеуказанных предпосылок:

интегральная модель:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в пять раз);

– для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;

зонная (зональная) модель:

– для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в пять раз);

– для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

– для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и др.);

полевая модель:

– для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и др.);

– для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и др.);

– для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т. д.).

При использовании интегральной и зонной моделей для помещения, один из линейных размеров которого более чем в пять раз превышает хотя бы один из двух других линейных размеров, необходимо это помещение делить на участки, размеры которых соизмеримы между собой, и рассматривать участки как отдельные помещения, сообщающиеся проемами, площадь которых равна площади сечения на границе участков. Использование аналогичной процедуры в случае, когда два линейных размера превышают третий более чем в пять раз, не допускается.

Для одиночного помещения высотой не более 6 м, удовлетворяющего условиям применения интегральной модели, при отсутствии систем противопожарной защиты, влияющих на развитие пожара, допускается определять критиче-

скую продолжительность пожара по каждому из опасных факторов пожара с помощью аналитических соотношений, представленных в лекции 11.

На основе результатов, полученных при моделировании динамики развития пожара, рассчитывается время достижения каждым из опасных факторов пожара своего предельно допустимого значения на путях эвакуации. Критическое время по каждому из опасных факторов пожара определяется как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола (табл. 1.3).

Отметим, что при использовании полевой модели определение критического времени имеет существенные особенности, связанные с тем, что критическое значение в различных точках помещения достигается не одновременно. Для помещений с соизмеримыми горизонтальными размерами критическое время определяется как максимальное из критических времен для эвакуационных выходов из данного помещения (время блокирования последнего выхода).

Время блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара $\tau_{\text{бл}}$ определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{ \tau_{\text{кр}}^{\text{T}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, \tau_{\text{кр}}^{\text{ТГ}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{дым}} \}. \quad (12.1)$$

Полученное значение $\tau_{\text{бл}}$ используется в формулах, по которым определяется величина *пожарного риска* [1–5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изложенном выше учебном материале представлены классические детерминистические математические модели пожара в помещении. Эти модели продолжают уточняться, совершенствоваться и, как правило, усложняться. Для их численной реализации требуются всё более эффективные методы вычислительной математики и высокопроизводительная вычислительная техника. Однако следует отметить, что важнейшим параметром возможного пожара в помещении, характеризующим пожарную опасность этого объекта, является так называемая удельная тепловая мощность пожара в единицу времени. Ее оценка требует учета не только вида горючей нагрузки (ее физико-химических параметров, общего количества) и характера ее размещения в рассматриваемом помещении, но и строительных и архитектурных особенностей этого объекта, возможных условий развития в нем пожара (в частности, степени разрушения остекленённых проемов ограждающих конструкций), от чего существенно зависит характер тепло- и массообмена при пожаре в данном помещении, а значит, его последствия и условия ликвидации.

Очевидно, что значительная часть перечисленных факторов и параметров уже не может быть задана каким-то единственным набором числовых значений. При этом принципиально допустимо широкое варьирование этих значений и огромное количество возможных вариантов их сочетаний. Кроме того, следует учитывать вероятностные оценки надежности и эффективности работы систем пожарной сигнализации и автоматического тушения, условий эвакуации людей из горящего здания. Из сказанного следует вывод о том, что любой реальный пожар можно и нужно рассматривать как самый сложный случайный процесс (в теоретико-вероятностном смысле), характеризуемый многократной неопределенностью. Поэтому дальнейшее развитие теории огнестойкости получает именно на *стохастической* основе и, наряду с детерминистическими моделями пожаров разных типов, все большее внимание уделяется разработке и практическому использованию аналитических *вероятностных* моделей пожаров [16, 17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Рос. газета. – 2008. – 1 авг.
2. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 78 с.
3. ГОСТ 12.3.047–98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования, методы контроля. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 85 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382. – М. : Центр пропаганды, 2009. – 52 с.
5. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приложение к приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404. – М. : Центр пропаганды, 2009. – 44 с.
6. Базаров, И.П. Термодинамика : учебник / И.П. Базаров. – СПб. : Лань, 2010. – 375 с.
7. Введение в математическое моделирование / под ред. П.И. Трусова. – М. : Университет. книга, 2007. – 592 с.
8. Дворецкий, С.И. Моделирование систем / И.С. Дворецкий, Ю.Л. Муромцев, В.А. Погонин. – М. : Академия, 2009. – 482 с.
9. Грачёв, В.Ю. Введение в моделирование пожаров для расчета пожарного риска / В.Ю. Грачёв. – Екатеринбург : СИТИС, 2009. – 120 с.
10. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М. : Стройиздат, 1990. – 421 с.
11. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2007. – 265 с.
12. Кошмаров, М.Ю. Моделирование динамики начальной стадии пожара в помещениях, зданиях и сооружениях при воспламенении горючей жидкости : дис. ... канд. техн. наук / Кошмаров Михаил Юрьевич. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2004. – 201 с.
13. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2000. – 118 с.
14. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 444 с.
15. Методические рекомендации по использованию программы CFAST. – Екатеринбург : СИТИС, 2009. – 58 с.

16. Моделирование пожаров и взрывов / под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2000. – 482 с.
17. Молчадский, И.С. Пожар в помещении / И.С. Молчадский. – М. : ВНИИПО МЧС России, 2005. – 455 с.
18. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях : метод. рекомендации. – М. : ВНИИПО МЧС России, 2003. – 35 с.
19. Пузач, С.В. Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. – 150 с.
20. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
21. Расчет распространения ОФП. Техническое руководство СИТИС: Блок 2.50. – Екатеринбург : СИТИС, 2011. – 72 с.
22. Расчет распространения ОФП. Техническое руководство СИТИС: ВИМ 1.60. – Екатеринбург : СИТИС, 2011. – 64 с.
23. Рекомендации по использованию программы FDS с применением программ PyroSim 2010-2 и SmokeView. – Екатеринбург : СИТИС, 2011. – 88 с.
24. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Эдиториал УРСС, 2003. – 782 с.
25. Сычев, В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики / В.В. Сычев. – М. : Высш. шк., 1991. – 224 с.
26. Справочник инженера пожарной охраны / под ред. Д.Б. Самойлова. – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 864 с.
27. Тарасевич, Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование / Ю.Ю. Тарасевич. – М. : Либроком, 2011. – 364 с.
28. Терещнев, В.В. Справочник спасателя-пожарного / В.В. Терещнев, Н.С. Артемьев, В.А. Грачев. – М. : Центр пропаганды, 2006. – 528 с.
29. Термогазодинамика пожаров в помещениях / под ред. Ю.А. Кошмарова. – М. : Стройиздат, 1988. – 448 с.
30. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б.Н. Юдаев. – М. : Высш. шк., 1988. – 479 с.

Учебное издание

Храпский Сергей Филиппович

Прогнозирование опасных факторов пожара

Конспект лекций

Редактор *О. В. Маер*
Компьютерная верстка *О. Н. Савостеевой*

Сводный темплан 2012 г.

Подписано в печать 16.03.12. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,0.

Тираж 70 экз. Заказ 214.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12

Типография ОмГТУ

