

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

Академия Государственной противопожарной службы

Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении

Учебное пособие

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

Москва 2012

УДК 614.8(075.8)

ББК 38.96

П78

Р е ц е н з е н т ы:

Начальник нормативно-технического отдела
Департамента надзорной деятельности МЧС России
А. А. Бондарев

Кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры государственного надзора
Ивановского института ГПС МЧС России
М. Ю. Овсянников

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Динамика и управления полетом ракет
и космических аппаратов» МГТУ имени Н. Э. Баумана
В. Т. Калугин

Кандидат юридических наук,
заместитель начальника Главного управления
по надзорной деятельности МЧС России по г. Москве
С. В. Аникеев

П78 **Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении** :
учеб. пособие / Ю. А. Кошмаров, С. В. Пузач, В. В. Андреев и др. – М. :
Академия ГПС МЧС России, 2012. – 126 с.

ISBN 978-5-9229-0050-8

В учебном пособии рассмотрено физическое содержание опасных факторов пожара, приведены их предельно допустимые значения, изложены основы современных методов прогнозирования их динамики в помещениях с использованием различных уровней математического описания пожара. Описаны методы численного решения дифференциальных уравнений интегральной математической модели пожара. Изложена сущность зонного и полевого (дифференциального) методов математического моделирования пожара. Приведены параметры горючей нагрузки для жилых и нежилых помещений.

Содержание пособия соответствует учебной программе для слушателей и курсантов Академии ГПС МЧС России, обучающихся по специальности «Пожарная безопасность».

Учебное пособие может быть полезно для научных и инженерных работников, преподавателей и адъюнктов, слушателей высших и средних образовательных учреждений МЧС России пожарно-технического профиля.

УДК 614.8(075,8)

ББК 38.96

ISBN 978-5-9229-0050-8

© Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, 2012

Введение. Общие сведения о методах прогнозирования опасных факторов пожара в помещении

В современных условиях разработка экономически оптимальных и эффективных противопожарных мероприятий немыслима без научно обоснованного прогноза динамики опасных факторов пожара (ОФП).

Прогнозирование ОФП необходимо:

- при разработке рекомендаций по обеспечению безопасной эвакуации людей при пожаре;
- при создании и совершенствовании систем сигнализации и автоматических систем пожаротушения;
- при разработке оперативных планов тушения (планировании действий подразделений на пожаре);
- при оценке фактических пределов огнестойкости;
- для многих других целей.

Современные методы прогнозирования ОФП не только позволяют «заглядывать в будущее», но и дают возможность снова «увидеть» то, что уже когда-то и где-то произошло. Другими словами, теория прогнозирования позволяет воспроизвести картину развития реально произошедшего пожара. Это необходимо, например, при криминалистической или пожарно-технической экспертизе пожара.

Опасными факторами пожара, воздействующими на людей и имущество, (согласно ФЗ РФ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») являются:

- пламя и искры,
- тепловой поток,
- повышенная температура окружающей среды,
- повышенная концентрация токсических продуктов горения и термического разложения,
- пониженная концентрация кислорода,
- снижение видимости в дыму.

С научных позиций ОФП являются физическими понятиями и, следовательно, каждый из них представлен в количественном отношении одной или несколькими физическими величинами. С этих позиций рассмотрим вышеперечисленные ОФП.

Первый опасный фактор – пламя. Пламя – это видимая часть пространства (пламенная зона), внутри которой протекает процесс окисления (горения) и происходит тепловыделение, а также генерируются токсичные газообразные продукты и поглощается забираемый из окружающего

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

По отношению к объему помещения, заполненному газом, пламенную зону, с одной стороны, можно рассматривать как источник тепловой энергии и токсичных продуктов горения, а также мельчайших твердых (жидких) частиц, из-за которых ухудшается видимость. С другой стороны, пламенную зону можно рассматривать как «сток», в который уходит кислород из помещения.

В связи с вышесказанным содержание понятия «пламя» представлено в количественном отношении следующими величинами:

- характерными размерами пламенной зоны (очага горения), например площадью горения (площадью пожара) $F_{Г}$, м²;
- количеством сгорающего (окисляемого) за единицу времени горючего материала (ГМ) (скоростью выгорания) ψ , кг·с⁻¹;
- мощностью тепловыделения $Q_{\text{пож}}$, Вт ($Q_{\text{пож}} = \psi Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$, где $Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$ – теплота сгорания, Дж·кг⁻¹);
- количеством генерируемых за единицу времени в пламенной зоне токсичных газов ψL_i , кг·с⁻¹, где L_i – количество i -го токсичного газа, образующегося при сгорании единицы массы ГМ;
- количеством кислорода, потребляемого в зоне горения, ψL_1 , кг·с⁻¹, где L_1 – количество кислорода, необходимое для сгорания (окисления) единицы массы ГМ;
- оптическим количеством дыма, образующегося в очаге горения, ψD , Нп·м²·с⁻¹, где D – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м²·кг⁻¹.

Второй опасный фактор – плотность теплового потока q . Этот фактор количественно характеризуется величиной теплового потока, приходящегося на единицу поверхности тела человека или на единицу поверхности материалов, приборов, оборудования, ограждающих конструкций, Вт/м².

Третий опасный фактор – повышенная температура среды. Температура среды, заполняющей помещение, является параметром состояния.

Физическое содержание этого параметра рассмотрено в книге «Термодинамика и теплопередача в пожарном деле» [17], он обозначается T , если используется размерность по Кельвину, или t , если используется размерность по Цельсию.

Четвертый опасный фактор – токсичные продукты горения. Этот фактор количественно характеризуется парциальной плотностью (или концентрацией) каждого токсичного газа.

Парциальная плотность компонентов газовой среды в помещении является параметром состояния. Обозначается ρ , размерность – $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Сумма парциальных плотностей всех компонентов газовой среды равна плотности газа ρ . Концентрацией i -го токсичного газа x_i обычно называют отношение парциальной плотности этого газа ρ_i к плотности газа ρ , т. е.

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

Если умножить отношение $\frac{\rho_i}{\rho}$ на 100, то получим значение концентрации продукта в процентах.

Пятый опасный фактор – пониженная концентрация кислорода в помещении. Этот фактор количественно характеризуется значением парциальной плотности кислорода ρ_1 или отношением ее к плотности газовой среды в помещении, т. е.

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

Шестой опасный фактор пожара – снижение видимости в дыму. Этот фактор количественно представляют параметром, называемым оптической концентрацией дыма. Этот параметр обозначают μ , его размерность – $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$. (Иногда параметр μ называют натуральным показателем ослабления.) Расстояние видимости в дыму $l_{\text{вид}}$ и оптическая концентрация дыма связаны между собой простым 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 возникновения пожара в процессе его развития эти параметры состояния непрерывно изменяются во времени, τ , т. е.

$$T = f_1(\tau); \rho_1 = f_2(\tau); \mu = f_3(\tau); \rho_{\text{O}_2} = f_4(\tau).$$

Совокупность этих зависимостей составляет суть динамики ОФП.

При рассмотрении воздействия ОФП на людей используются так называемые предельно допустимые значения параметров состояния среды в зоне пребывания людей (рабочей зоне).

Предельно допустимые значения ОФП получены в результате обширных медико-биологических исследований, в процессе которых установлен характер воздействия ОФП на людей в зависимости от значений количественных характеристик ОФП.

Так, например, установлено, что если концентрация кислорода O_2 уменьшится вдвое по сравнению с нормальной концентрацией его в воздухе (нормальная концентрация составляет 23 %, т. е. приблизительно 270 г O_2 в m^3 воздуха), т. е. будет составлять 135 г O_2 в m^3 воздуха, то нарушается деятельность сердечно-сосудистой системы и органов дыхания человека, а также он теряет способность реальной оценки событий.

При уменьшении концентрации кислорода в 3 раза по сравнению с нормальной концентрацией останавливается дыхание и через 5 мин останавливается работа сердца.¹

Следует подчеркнуть, что в условиях пожара имеет место одновременное воздействие на человека всех ОФП. Вследствие этого опасность многократно увеличивается. Предельно допустимые значения ОФП указаны в ФЗ РФ №123-ФЗ и ГОСТ 12.1.004–91. Ниже они представлены в виде таблицы.

Предельно допустимые для человека значения ОФП

ОФП, обозначение, размерность	Предельно допустимое значение
Температура t , °С	70
Плотность теплового потока, q , Вт/ m^2	1 400
Парциальная плотность, $kg \cdot m^{-3}$:	
кислорода ρ_{O_2}	0,226
оксида углерода ρ_{CO}	0,001 16
диоксида углерода ρ_{CO_2}	0,11
хлористого водорода ρ_{HCl}	$23 \cdot 10^{-6}$
Оптическая плотность дыма μ , Нп· m^{-1}	$2,38 l_{ПДВ}^*$

* $l_{ПДВ}$ – предельно допустимая дальность видимости, м.

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

¹ Руководство по борьбе за живучесть подводной лодки. – М., Воениздат, 1983.

критического значения температуры арматуры этих конструкций. Обычно считается, что при нагревании арматуры до температуры, равной 400–450 °С, происходит разрушение железобетонной конструкции.

При оценке воздействия пожара на остекление предполагается, что при температуре газовой среды в помещении, равной 300–350 °С, будет происходить разрушение остекления.

Современные научные методы прогнозирования ОФП основываются на математическом моделировании, т. е. на математических моделях пожара. Математическая модель пожара описывает в самом общем виде изменение параметров состояния среды в помещении в течение времени, а также изменение параметров состояния ограждающих конструкций этого помещения и различных элементов технологического оборудования.

Основные уравнения, из которых состоит математическая модель пожара, вытекают из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики, закона сохранения массы и закона сохранения импульса.

Эти уравнения отражают и увязывают 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 помещения с окружающей средой и со смежными помещениями, теплообмен и нагревание ограждающих конструкций, снижение концентрации кислорода в помещении.

Методы прогнозирования ОФП различают в зависимости от вида математической модели пожара. Математические модели пожара в помещении условно делятся на три класса (три вида): интегральные, зонные, полевые (дифференциальные).

Интегральная модель пожара позволяет получить информацию, т. е. сделать прогноз о средних значениях параметров состояния среды в помещении для любого момента развития пожара.

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.

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 можно выделить, например, в начальной стадии пожара припотолочную область пространства, область восходящего над очагом горения потока нагретых газов и область незадымленной холодной части пространства.

Полевая (дифференциальная) модель позволяет рассчитать для любого момента развития пожара значения всех локальных параметров состояния во всех точках пространства внутри помещения.

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 этом отношении наиболее детальные сведения можно получить с помощью полевой модели.

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

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

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 t . Искомыми функциями являются также координаты, определяющие положение границ характерных зон.

Наиболее сложной в математическом отношении является 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, закон диффузии, закон радиационного переноса и т. п.

В более общем случае к этой системе уравнений добавляется дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее процесс нагревания ограждающих конструкций. Искомыми функциями 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 т. д. Независимыми аргументами являются координаты x , y , z и время t .

Следует подчеркнуть, что основные дифференциальные уравнения всех названных математических моделей пожара вытекают из неопровержимых фундаментальных законов природы. В связи с этим уместно указать, что основные дифференциальные уравнения интегральной модели пожара можно получить, например, из уравнений полевой (дифференциальной) модели путем интегрирования последних по объему помещения.

Следовательно, в принципе, результаты вычислений искомым функций, с которыми оперирует та или иная модель пожара, должны были бы

иметь одинаковую степень достоверности. Однако адекватность результатов расчетов реальному пожару определяется не только системой основных (базовых) уравнений каждой модели пожара. Дело в том, что в каждой модели привлекаются дополнительные функциональные зависимости для вычисления тех или иных физических величин, содержащихся в математическом описании пожара.

Например, в полевой модели могут привлекаться различные дополнительные уравнения для вычисления коэффициентов турбулентного переноса энергии, импульса и компонентов газовой среды. В интегральной и зонной моделях могут использоваться различные формулы для вычисления тепловых потоков в ограждающие конструкции. Поэтому при оценке достоверности результатов прогнозирования необходимо прежде всего учитывать уровень научных разработок вопросов, определяющих содержание дополнительных функциональных зависимостей.

Чтобы сделать научно обоснованный прогноз, обращаются к той или иной модели пожара. Выбор модели определяется целью (задачами) прогноза. Путем решения системы дифференциальных уравнений, которые составляют основу выбранной математической модели, устанавливают конкретный характер динамики ОФП.

Следует отметить, что даже при использовании интегральной модели пожара получить аналитическое решение присущей этой модели системы обыкновенных дифференциальных уравнений в общем случае невозможно.

В силу сказанного реализация вышеназванных методов прогнозирования возможна лишь путем численного решения системы дифференциальных уравнений, присущих выбранной модели пожара. Это численное решение можно выполнить только с помощью современных компьютеров. Именно поэтому разработка и реализация математических моделей пожара началась сравнительно недавно.

Интегральная модель пожара как в своей основе, так и в деталях была разработана в середине 70-х гг. прошлого века и опубликована в 1976 г. одним из авторов этой книги Ю. А. Кошмаровым (труды ВНИИПО, научные отчеты ВИПТШ). Спустя год после этой публикации японским исследователем Т. Танака была напечатана статья на эту тему (Takeyoshi Tanaka «A Mathematical model of a compartment fire un modele mathematique de l'incendie d'une piece»). Статья Т. Танака повторяла опубликованное проф. Ю. А. Кошмаровым, содержала ряд погрешностей и носила незавершенный характер.

Существенное развитие и дополнение получила интегральная математическая модель пожара в работах учеников проф. Ю. А. Кошмарова – А. В. Матюшина, С. И. Зернова, В. М. Астапенко, Ю. С. Зотова, А. Н. Шевлякова,

И. Д. Гуско, В. А. Козлова и др. В частности, интегральная модель пожара была дополнена дифференциальным уравнением, описывающим изменение оптической концентрации дыма в помещении при пожаре.

Первая зонная модель пожара была предложена в диссертации польского инженера Е. Воланина, выполненной под руководством проф. Ю. А. Кошмарова. В последующие годы зонные модели получили существенное развитие в работах Е. Воланина и В. Н. Тимошенко и др.

Полевая модель пожара впервые в законченном виде (для ограниченных условий) была реализована в диссертации А. М. Рыжова, выполненной в 1982–1985 гг. под руководством проф. Ю. А. Кошмарова.

Эта модель разрабатывалась в последующие годы И. Ф. Астаховой [31] и рядом иностранных исследователей. Существенный вклад в развитие метода прогнозирования параметров пожара на основе полевой модели внес также за последние годы А. М. Рыжов, продолживший работу, начатую еще в кандидатской диссертации, а также проф. В. Л. Страхов и С. В. Пузач.

Интегральная математическая модель пожара в помещении

Исходные положения и основные понятия интегрального метода термодинамического анализа пожара

Интегральная математическая модель пожара описывает в самом общем виде процесс изменения во времени состояния газовой среды в помещении.

С позиций термодинамики газовая среда, заполняющая помещение с проемами (окна, двери и т. п.) во время пожара, как объект исследования есть открытая термодинамическая система (рис. 1.1). Ограждающие конструкции (пол, потолок, стены) и наружный воздух (атмосфера) являются внешней средой по отношению к этой термодинамической системе. Граница между термодинамической системой и внешней средой (контрольная поверхность) показана условно на рис. 1.1 пунктирной линией.

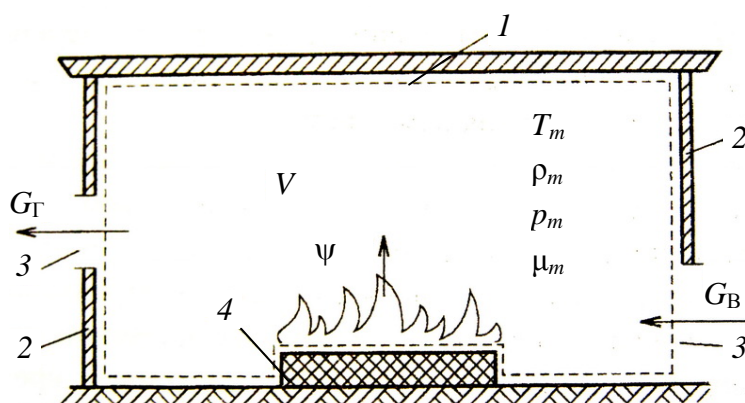


Рис. 1.1. Схема термодинамической системы пожара в помещении:
1 – контрольная поверхность (обозначена пунктиром); 2 – ограждения;
3 – проемы (окна, двери); 4 – горящий материал;
 G_G – расход уходящих газов; G_B – расход поступающего холодного воздуха;
 ψ – скорость выгорания материала; T_m – среднemasсовая температура газовой среды;
 ρ_m – среднeобъемная плотность газовой среды; p_m – среднeобъемное давление;
 μ_m – среднeобъемная оптическая плотность дыма

Эта система взаимодействует с внешней средой путем тепло- и массообмена. В процессе развития пожара через одни проемы выталкиваются из помещения нагретые газы, а через другие – поступает холодный воздух. Количество вещества, т. е. масса газа в рассматриваемой открытой термодинамической системе, в течение времени изменяется. Поступление холодного воздуха обусловлено работой проталкивания, которую совершает внешняя среда.

Термодинамическая система в свою очередь совершает работу, выталкивая нагретые газы во внешнюю атмосферу. Она взаимодействует также с ограждающими конструкциями путем теплообмена. Кроме того, в эту систему с поверхности горящего материала (т. е. из пламенной зоны) поступают газообразные продукты горения.

Состояние рассматриваемой термодинамической системы изменяется в результате взаимодействия с окружающей средой. Приступая к изложению сути интегрального метода описания процесса изменения состояния рассматриваемой термодинамической системы, отметим прежде всего следующие два факта. Во-первых, всегда с большой точностью можно считать, что 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.

Это означает, что локальные значения основных термодинамических параметров состояния (плотность, давление, температура) связаны между собой уравнением Клапейрона, т. е.

$$p = \rho RT, \quad (1.1)$$

где p – локальное давление, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$;
 ρ – локальная плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;
 R – газовая постоянная, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{К}^{-1}$;
 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 среды в помещении позволяет не рассматривать эту задачу.

В интегральном методе описания состояния термодинамической системы, которой является газовая среда в помещении во время пожара, 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 целесообразно использовать при исследовании процесса изменения состояния термодинамической системы среднеобъемные параметры – среднеобъемную плотность газовой среды и среднеобъемную (удельную) внутреннюю энергию.

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

$$\rho_m = \frac{M}{V}, \quad (1.2)$$

где M – масса газа, заполняющего помещение, кг;
 V – свободный объем помещения, м³.

Нижний индекс m , используемый здесь и далее, представляет собой первую букву в немецком слове *mittel* (средний). Следует отметить, что

$$M = \int_V \rho dV. \quad (1.3)$$

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

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \rho dV. \quad (1.4)$$

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 смеси ρ_{mi} представляет собой отношение массы i -го компонента смеси (например O_2), содержащейся в объеме помещения, к объему помещения, т. е.

$$\rho_{mi} = \frac{M_i}{V}, \quad (1.5)$$

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

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

$$\rho_{mi} = \frac{1}{V} \int_V \rho_i dV, \quad (1.6)$$

где ρ_i – локальное значение парциальной плотности i -го компонента, кг·м³.

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

$$u_m = \frac{U}{V}, \quad (1.7)$$

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

С формальных позиций среднеобъемная внутренняя энергия газовой среды u_m есть результат осреднения по объему всех значений локальной удельной (объемной) внутренней энергии, т. е.

$$u_m = \frac{1}{V} \int_V u_V dV, \quad (1.8)$$

где u_V – локальное значение удельной объемной внутренней энергии, Дж·м⁻³.

Локальные значения удельной объемной внутренней энергии u_V и удельной массовой внутренней энергии u связаны между собой простым соотношением, которое имеет следующий вид:

$$u_V = \rho u, \quad (1.9)$$

где u – локальное значение удельной массовой внутренней энергии газа, Дж·кг⁻¹.

Отметим здесь, что между локальным значением удельной массовой внутренней энергии u и локальной температурой идеального газа T существует простая взаимосвязь, а именно

$$u = c_V T, \quad (1.10)$$

где c_V – изохорная теплоемкость газа, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

В интегральном методе описания процесса изменения состояния термодинамической системы (т. е. газовой среды в помещении) вместо среднеобъемной внутренней энергии u_m используется параметр состояния, называемый среднеобъемным давлением p_m . Эти два параметра в формальном отношении являются взаимозаменяемыми. Покажем это. Формулу (1.8) можно преобразовать с помощью выражений (1.9) и (1.10):

$$u_m = \frac{1}{V} \int_V c_V \rho T dV. \quad (1.11)$$

Если теперь воспользоваться уравнением Клапейрона (1.1), то формулу (1.11) можно преобразовать и получить следующее выражение:

$$u_m = \frac{1}{V} \int_V \frac{1}{k-1} p dV, \quad (1.12)$$

где $k = c_P / c_V$ – отношение изобарной и изохорной теплоемкостей идеального газа (показатель адиабаты).

С достаточной для практики точностью можно считать, что показатель адиабаты во всех точках внутри помещения есть одна и та же постоянная величина. С учетом этого замечания формулу (1.12) можно преобразовать:

$$u_m = \frac{1}{k-1} \left[\frac{1}{V} \int_V p dV \right]. \quad (1.13)$$

Выражение в прямоугольных скобках представляет собой операцию осреднения всех локальных значений давления по объему помещения. Результат этого осреднения называют среднеобъемным давлением p_m , т. е.

$$p_m = \frac{1}{V} \int_V p dV. \quad (1.14)$$

Сравнивая выражения (1.13) и (1.14), получим следующее соотношение между среднеобъемной внутренней энергией u_m и среднеобъемным давлением p_m :

$$u_m = \frac{1}{k-1} p_m. \quad (1.15)$$

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

Степень нагретости газовой среды характеризуется в среднем отношением внутренней энергии этой среды к ее массе. Отношение этих физических величин можно представить с помощью формул (1.2), (1.7) и (1.15) в следующем виде:

$$\frac{U}{M} = \frac{p_m}{(k-1)\rho_m}. \quad (1.16)$$

Если правую и левую части равенства (1.16) поделить на изохорную теплоемкость, то получится следующее выражение:

$$\frac{U}{c_v M} = \frac{p_m}{R\rho_m}. \quad (1.17)$$

Комплекс в левой части выражения (1.17) имеет размерность «Кельвин». Этот комплекс представляет собой параметр состояния рассматриваемой термодинамической системы, который называется среднеобъемной температурой газовой среды, т. е.

$$T_m = \frac{U}{c_v M}. \quad (1.18)$$

С помощью выражения (1.18) можно преобразовать формулу (1.17) и в результате получить следующее уравнение:

$$p_m = \rho_m RT_m. \quad (1.19)$$

Это уравнение связывает между собой три параметра состояния. По внешнему виду это уравнение такое же, как уравнение Клапейрона для локальных параметров состояния. В дальнейшем уравнение (1.19) для краткости будем называть *усредненным уравнением состояния газовой среды*, заполняющей помещение.

Представляется интересным вопрос о том, как выражается средне-массовая температура, определение которой представлено выражением (1.18) через локальные значения температур. Этот вопрос возникает при постановке натуральных экспериментов.

Ограничимся здесь анализом этого вопроса применительно к пожарам, протекающим без взрывов, сопровождающихся ударными волнами. Особенностью таких пожаров является то обстоятельство, что значения локальных абсолютных давлений во всех точках внутри помещения отличаются очень незначительно от среднеобъемного давления на всех этапах развития пожара.

Другими словами, при таких пожарах отношение локального абсолютного давления в каждой точке внутри помещения к среднеобъемному давлению почти не отличается от единицы.

Чтобы получить формулу, с помощью которой можно вычислить среднемассовую температуру при известном распределении локальных температур по объему помещения, воспользуемся усредненным уравнением состояния газовой среды (1.19), которое преобразуем с помощью формулы (1.4) и уравнения Клапейрона (1.1):

$$T_m = \frac{p_m}{\left[\frac{1}{V} \int_V \rho R dV \right]} = \frac{1}{\left[\frac{1}{V} \int_V \left(\frac{p}{p_m} \right) \frac{dV}{T} \right]}. \quad (1.20)$$

С учетом того, что $\frac{p}{p_m} \approx 1$, уравнение (1.20) преобразуется в следующее:

$$T_m \approx \left[\frac{1}{V} \int_V \frac{dV}{T} \right]^{-1}. \quad (1.21)$$

Формула (1.21) позволяет вычислить среднемассовую температуру, если известно распределение локальных температур по объему помещения (например, если в натурном эксперименте измерены локальные температуры в достаточно большом количестве точек внутри помещения).

С формальных позиций формулу (1.21) можно рассматривать как один из методов осреднения всех значений локальных температур. Наряду с этим в практике экспериментальных исследований пожаров используется метод осреднения всех значений локальных температур с помощью следующей формулы:

$$T_{mV} = \frac{1}{V} \int_V T dV, \quad (1.22)$$

где T_{mV} – среднеобъемная температура среды, К.

Среднеобъемная температура, вычисляемая по формуле (1.22), и среднемассовая температура, вычисляемая по формуле (1.21), при однородном температурном поле равны друг другу. При неоднородном температурном поле эти температуры, вообще говоря, неодинаковы. Различие этих температур тем больше, чем больше неоднородность температурного поля.

В качестве примера вычислим значения среднемассовой и среднеобъемной температур при линейном распределении локальных температур газа по высоте помещения. Пусть распределение температур по высоте помещения описывается уравнением

$$T = T_1 \left[1 + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \bar{y} \right], \quad (1.23)$$

где $\bar{y} = \frac{y}{h}$ (h – высота помещения;

y – расстояние, отсчитываемое по вертикали от пола помещения);

T_1 – локальная температура газа у пола (т. е. при $y = 0$);

T_2 – локальная температура у потолка (т. е. при $y = h$).

С учетом того, что $V = F_{\text{пол}} h$ и $dV = F_{\text{пол}} dy$ ($F_{\text{пол}}$ = площадь пола), формула (1.21) примет вид

$$T_m = \left[\frac{1}{h} \int_0^h \frac{1}{T} dy \right]^{-1}. \quad (1.24)$$

Подставив в уравнение (1.24) выражение (1.23) и затем выполнив операцию интегрирования, получим следующий результат:

$$T_m = \left[\frac{1}{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]^{-1}. \quad (1.25)$$

Формула (1.22) с учетом ранее сказанного преобразуется следующим образом:

$$T_m = \frac{1}{h_0} \int^h T dy. \quad (1.26)$$

Подставив в уравнение (1.26) выражение (1.23) и выполнив операцию интегрирования, получим следующий результат:

$$T_{mV} = T_1 \frac{1}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} + 1 \right). \quad (1.27)$$

Отношение среднемассовой температуры к среднеобъемной определим с помощью формул (1.25) и (1.27):

$$\frac{T_m}{T_{mV}} = \frac{2 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} + 1 \right) \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}. \quad (1.28)$$

Согласно экспериментальным данным, отношение локальных температур газа у потолка и у пола может при пожаре составлять величину $\frac{T_2}{T_1} = 1,5$. При таком соотношении локальных температур у потолка и у пола отличие среднемассовой температуры от среднеобъемной составляет 1,35 % (т. е. $\frac{T_m}{T_{mV}} = 0,9865$).

При условиях, когда абсолютная температура газа у потолка вдвое выше абсолютной температуры у пола, среднемассовая температура будет отличаться от среднеобъемной, согласно формуле (1.28), на 3,7 %.

В заключение следует отметить, что среднемассовая температура при реальных пожарах всегда несколько ниже среднеобъемной. В условиях реальных пожаров относительная разность этих температур обычно не превышает 5–6 %. Здесь необходимо подчеркнуть, что погрешности измерения температур в натуральных экспериментах могут составлять приблизительно 2–3 %.

Газовая среда, заполняющая помещение при пожаре, содержит в себе 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 можно не учитывать присутствие этих частиц при вычислениях таких параметров состояния среды, как среднеобъемная плотность, среднеобъемное давление и средне-массовая 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 μ_m .

Среднеобъемная плотность (концентрация) дыма μ_m , $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$ представляет собой отношение оптического количества дыма S , $\text{Нп} \cdot \text{м}^2$, находящегося в помещении, к объему помещения, т. е.

$$\mu_m = \frac{S}{V}. \quad (1.29)$$

Оптическое количество дыма в помещении S есть произведение средней концентрации твердых частиц N , м^{-3} , объема помещения и эффективного сечения экстинкции частиц χ , м^2 :

$$S = NV\chi. \quad (1.30)$$

Чем выше оптическая плотность (концентрация) дыма, тем хуже видимость в помещении. Оптическая плотность дыма μ_m и дальность видимости $l_{\text{вид}}$ связаны между собой следующим приближенным соотношением:

$$\mu_m = \frac{2,38}{l_{\text{вид}}}. \quad (1.31)$$

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

Дымообразующая способность горючего материала D , $\text{Нп} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ есть оптическое количество дыма, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала, т. е.

$$D = J\chi, \quad (1.32)$$

где J – число частиц, образующихся при сгорании единицы массы горючего материала, кг^{-1} .

Дифференциальные уравнения пожара

Уравнения пожара описывают в самом общем виде изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в течение времени (в процессе развития пожара). Эти уравнения были сформулированы проф. Ю. А. Кошмаровым [15].

Уравнения пожара являются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Они вытекают, как и большинство уравнений математической физики, из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы и закона сохранения массы.

Подробный вывод этих уравнений приведен в учебнике Ю. А. Кошмарова и М. П. Башкирцева «Термодинамика и теплопередача в пожарном деле» [17]. Ограничимся здесь кратким изложением рассуждений, используемых при выводе уравнений пожара.

Первое уравнение – *уравнение материального баланса пожара в помещении* – вытекает из закона сохранения массы. Применительно к газовой среде, заполняющей помещение, этот закон можно сформулировать так: 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. На рис. 1.1 (см. с. 11) эта поверхность условно показана пунктирной линией.

Часть этой поверхности совпадает с поверхностью ограждений (стены, пол, потолок). Там, где находятся проемы, эта поверхность является воображаемой. Объем пространства, заключенный внутри этой поверхности, называется свободным объемом помещения и обозначается буквой V .

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:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = G_B + \psi - G_{\Gamma}, \quad (1.33)$$

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

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

Аналогичные рассуждения позволяют получить дифференциальные уравнения:

– баланса массы кислорода

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_1 V) = x_{1B} G_B - x_1 n_1 G_\Gamma - \psi L_1 \eta; \quad (1.34)$$

– баланса токсичного продукта горения

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_2 V) = \psi L_2 \eta - x_2 n_2 G_\Gamma; \quad (1.35)$$

– баланса оптического количества дыма

$$\frac{d}{d\tau}(\mu_m V) = D\psi - \frac{\mu_m n_3}{\rho_m} G_\Gamma - k_C F_W, \quad (1.36)$$

где ρ_1 – среднеобъемная парциальная плотность кислорода, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

ρ_2 – среднеобъемная парциальная плотность токсичного продукта горения, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

μ_m – среднеобъемная оптическая концентрация дыма, $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$;

x_{1B} – 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), $\text{кг}/\text{кг}$;

η – коэффициент полноты сгорания;

n_1 – коэффициент, учитывающий отличие концентрации кислорода в уходящих газах от среднеобъемной концентрации кислорода;

L_2 – стехиометрический коэффициент для продукта горения (количество продукта горения, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала), $\text{кг}/\text{кг}$;

$x_2 = \frac{\rho_2}{\rho_m}$ – средняя массовая доля токсичного газа в помещении;

n_2 – коэффициент, учитывающий отличие концентрации токсичного газа в уходящих газах от среднеобъемной концентрации этого газа;

n_3 – коэффициент, учитывающий отличие оптической концентрации дыма в уходящих газах от среднеобъемного значения оптической концентрации дыма;

F_W – площадь поверхности ограждений (потолка, пола, стен), м^2 ;

k_C – коэффициент седиментации частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций, $\text{Нп} \cdot \text{м}^{-1}$.

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.

Потоки 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 всего сказанного получается следующее уравнение энергии пожара:

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \eta Q_H^P \Psi + i_\Gamma \Psi + c_{PB} T_B G_B - c_P T_m m G_\Gamma - Q_W, \quad (1.37)$$

где i_Γ – энтальпия продуктов горения;

c_{PB} – изобарная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

T_B – температура воздуха;

Q_W – теплота, уходящая в ограждающие конструкции.

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.

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \frac{dU}{d\tau}. \quad (1.38)$$

В правой части уравнения (1.37) первый член представляет собой количество тепла, поступающего за единицу времени в газовую среду в результате горения (скорость тепловыделения). Второй член есть поток энергии в помещение, поступающий вместе с продуктами газификации (пиролиз, испарение) горючего материала.

Третий член представляет собой сумму внутренней тепловой энергии поступающего за единицу времени воздуха и работы проталкивания, которую совершает внешняя атмосфера. Четвертый член есть сумма внутренней тепловой энергии, которую уносят за единицу времени уходящие газы, и работа выталкивания, которую совершает рассматриваемая термодинамическая система. Пятый член представляет собой тепловой поток, поглощаемый ограничивающими конструкциями и излучаемый через проемы.

Представленные выше пять дифференциальных уравнений (1.33)–(1.38) 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 газовой среды (1.19).

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

$$\left. \begin{aligned} \rho_m(\tau = 0) = \rho_0; \quad p_m(\tau = 0) = p_0; \\ \rho_1(\tau = 0) = \rho_{01}; \\ \rho_2(\tau = 0) = 0; \quad \mu_m(\tau = 0) = 0. \end{aligned} \right\}, \quad (1.39)$$

где p_0 – давление в начальный момент времени;

ρ_{01} – плотность кислорода в начальный момент времени.

Представленная здесь система уравнений описывает свободное развитие пожара. Развитие пожара называют свободным, если не осуществляется тушение, т. е. если в помещение не подаются огнетушащие вещества. Эффекты, обусловленные подачей огнетушащих веществ в объем помещения, можно учесть путем введения в дифференциальные уравнения дополнительных членов.

Например, при тушении инертными газами (аргон, азот, диоксид углерода) уравнение материального баланса пожара записывается следующим образом:

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_m V) = G_B + \psi - G_{\Gamma} + G_{OB}, \quad (1.40)$$

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

Соответствующим образом изменяются в этом случае и остальные дифференциальные уравнения пожара [17].

Как уже говорилось, в уравнениях пожара искомыми (неизвестными) функциями являются среднеобъемные параметры газовой среды, а независимой переменной является 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, которые представляют собой сведения о размерах помещения (объем V и поверхность ограждений F_w) и свойствах горючего материала (теплота сгорания Q_H^p , стехиометрические коэффициенты L_1, L_2 , дымообразующая способность D , энтальпия продуктов газификации i_n) (база данных типовой горючей нагрузки, созданная во ВНИИПО МЧС России, представлена в приложении, см. с. 104–120).

Ко второй группе относятся те величины, которые зависят, помимо всего прочего, от параметров состояния среды в помещении. К этим величинам относятся массовые расходы поступающего через проемы воздуха G_B и уходящих через проемы газов G_T , тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы Q_w , коэффициент полноты сгорания η , скорость тепловыделения $\eta Q_H^p \psi$.

Для вычисления значений физических величин, относящихся ко второй группе, необходимо располагать дополнительными уравнениями.

Конкретный вид дополнительных уравнений установлен путем привлечения сведений из теории конвективного и лучистого теплообмена, теории газообмена помещения с окружающей атмосферой через проемы из-за различия плотностей наружного воздуха и газовой среды внутри помещения, теории горения.

В заключение необходимо сделать некоторые замечания по поводу общих положений, касающихся сущности описания пожара на уровне осредненных параметров состояния.

В интегральной математической модели мы оперируем с интегральными характеристиками термодинамической системы. Этот подход не требует каких-либо допущений и оговорок о том, как распределены локальные значения термодинамических параметров состояния по объему помещения.

Здесь не уместны оговорки – «предположим, что температурное поле является однородным» или часто используемое выражение о «размазанности» того или иного параметра состояния газовой среды.

Естественным является вопрос о том, как определить значение того или иного термодинамического параметра состояния в заданной точке объема помещения, если будет известно среднеобъемное значение. К этому вопросу мы вернемся в параграфах, посвященных интегральной математической модели пожара.

Отметим, что процесс развития пожара в помещении можно расчленить на ряд характерных временных этапов. Каждому этапу присущи характерные законы распределения локальных термодинамических параметров состояния внутри помещения. Это обстоятельство используется для ответа на поставленный вопрос.

Оглавление

Введение. Общие сведения о методах прогнозирования опасных факторов пожара в помещении	3
1. Интегральная математическая модель пожара в помещении	11
1.1. Исходные положения и основные понятия интегрального метода термодинамического анализа пожара.....	11
1.2. Дифференциальные уравнения пожара.....	19
2. Дополнительные уравнения интегральной математической модели пожара для расчета расходов уходящих газов и поступающего через проемы воздуха.....	25
2.1. Исходные положения	25
2.2. Распределение давлений по высоте помещения.....	25
2.3. Плоскость равных давлений и режимы работы проема	27
2.4. Распределение перепадов давлений по высоте помещения.....	29
2.5. Формулы для расчета газообмена через прямоугольные проемы.....	30
2.6. Влияние ветра на газообмен	33
3. Дополнительные уравнения интегральной математической модели пожара для расчета теплового потока в ограждения и скорости выгорания горючих материалов	34
3.1. Приближенная оценка величины теплового потока в ограждения	34
3.2. Эмпирические методы расчета теплового потока в ограждения.....	35
3.3. Полуэмпирические методы расчета теплового потока в ограждения.....	37
3.4. Методы расчета скорости выгорания горючих материалов и скорости тепловыделения.....	39
4. Математическая постановка и методы решения задачи о прогнозировании ОФП на основе интегральной математической модели пожара в помещении	44
4.1. Классификация интегральных моделей пожара.....	44
4.2. Интегральная математическая модель пожара для исследования динамики ОФП и ее численная реализация.....	45
4.3. Интегральная математическая модель начальной стадии пожара и расчет критической продолжительности пожара.....	49
4.3.1. Постановка задачи и ее решение.....	49
4.3.2. Расчет критических значений средних параметров состояния среды в помещении	58
4.3.3. Расчет коэффициента теплопоглощения (теплопотерь) при определении критической продолжительности пожара	60
5. Зонная математическая модель пожара в помещении	69

6. Дифференциальные (полевые) математические модели пожара в помещении	75
6.1. Особенности и способы упрощения термогазодинамической картины пожара.....	75
6.2. Структура полевой модели расчета тепломассообмена	76
6.3. Основные уравнения полевой модели пожара	77
6.4. Дополнительные соотношения полевой модели пожара.....	82
6.4.1. Уравнения для расчета процесса прогрева строительных конструкций.....	82
6.4.2. Расчет турбулентного тепломассообмена	85
6.4.3. Моделирование радиационного теплообмена	88
6.4.4. Расчет процесса выгорания горючей нагрузки.....	91
6.4.5. Моделирование горения.....	92
6.5. Условия однозначности	94
6.6. Моделирование действий систем пожаротушения	95
6.7. Моделирование действий систем механической вентиляции и дымоудаления	96
6.8. Метод численного решения дифференциальных уравнений	97
Заключение	103
Приложение. База данных типовой горючей нагрузки	104
Литература	121

Учебное издание

Кошмаров Юрий Антонович

Пузач Сергей Викторович

Андреев Владимир Викторович

Козлов Юрий Иванович

Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении

Учебное пособие

Редактор *А. В. Бондаренко*

Технические редакторы *А. В. Бондаренко, Е. Н. Титкова*

Корректор *З. А. Малаховская*

Подписано в печать 22.02.2012. Формат 60×90 1/16.

Печ. л. 7,75. Уч.-изд. л. 5,7. Бумага офсетная.

Тираж 400 экз. Заказ 119

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