

614.84/11

16-76

МИНИСТЕРСТВО ВНУТРЕННИХ ДЕЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Академия Государственной противопожарной службы

Ю.А. КОШМАРОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ
ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

*Допущено Министерством внутренних дел Российской Федерации
в качестве учебного пособия для слушателей высших и средних
образовательных учреждений пожарно-технического профиля*

*Одобрено редакционно-издательским советом
Академии ГПС МВД России*



МОСКВА 2000

УДК 536.46+614.841
ББК 24.54+31.31+38.96
К 76

Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. - М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

ISBN 59229-0011-0

Рецензенты: засл. деят. науки России, д-р техн. наук, проф. Г.А. Дрейцер (кафедра авиационно-космической теплотехники Московского авиационного института), канд. техн. наук, доцент Е.Т. Шурин (кафедра пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МВД России), канд. техн. наук, доцент А.С. Андросов (кафедра процессов горения Академии ГПС МВД России), канд. техн. наук В.П. Молчанов (ГУГПС МВД России)

Рассмотрено физическое содержание опасных факторов пожара, даны их предельно допустимые значения, изложены основы современных методов прогнозирования их динамики в помещениях с использованием различных уровней математического описания пожара. Описаны процедура численного решения дифференциальных уравнений интегральной математической модели пожара и компьютерная программа, разработанная на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МВД России. Изложена сущность зонного и полевого (дифференциального) методов математического моделирования пожара.

Содержание пособия соответствует учебной программе для слушателей и курсантов Академии ГПС МВД России по специальности "Пожарная безопасность".

Может быть полезно слушателям высших и средних пожарно-технических образовательных учреждений МВД России, а также адъюнктам и преподавателям смежных дисциплин.

ISBN 59229-0011-0

© Академия Государственной противопожарной службы
МВД России, 2000



КОШМАРОВ Юрий Антонович

К 70-летию со дня рождения

Родился 19 сентября 1930 г. в совхозе "Гигант" Сальского района Ростовской области. Среднее образование получил в г. Ясногорске Тульской области. В 1954 г. окончил энергомашиностроительный факультет Московского энергетического института (МЭИ). С 1954 по 1961 г. работал младшим научным сотрудником в лаборатории термодинамики Энергетического института АН СССР им. Г.М. Кржижановского (ЭНИИ). В 1958 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1961 г. был переведен с лабораторией в Институт механики АН СССР. В 1962 г. Президиумом АН СССР присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по специальности "механика". В 1964 г. перешел работать в

Московский авиационный институт (МАИ) на кафедру авиационно-космической теплотехники, где уже с 1960 г. читал курс лекций, и в 1964 г. высшей аттестационной комиссией (ВАК) был утвержден в ученое звание доцента. В 1968 г. в МАИ защитил докторскую диссертацию. Читал лекции в Московском лесотехническом институте (МЛТИ) и Всесоюзном заочном машиностроительном институте (ВЗМИ). С 1970 г. работает в Высшей инженерной пожарно-технической школе (ВИПТШ), преобразованной позднее в институт пожарной безопасности (МИПБ), а затем в Академию ГПС МВД России. С 1970 по 1976 г. был начальником кафедры физико-математических наук. В 1972 г. был утвержден ВАК в ученое звание профессора по специальности "теплофизика". В 1976 г. назначен начальником кафедры инженерной теплофизики и гидравлики.

Ю. А. Кошмаров является выдающимся российским ученым, внесшим большой вклад в различные области теплофизики, механики жидкости и газа, математического моделирования пожаров в помещениях различных строительных объектов и транспортных средств. В 1954-1957 гг. им впервые исследован теплообмен в турбулентном пограничном слое сжимаемого газа при ускоренном движении внешнего сверхзвукового потока и установлено влияние продольного градиента давления на закон теплообмена, а также влияние скачков уплотнения на теплоотдачу в соплах двигателей при их нерасчетном режиме работы. Результаты этой работы позволили решить проблему пожаровзрывобезопасности ракетных двигателей. Является автором работ, посвященных исследованию турбулентного движения жидкости между коаксиальными вращающимися цилиндрами, в результате которых впервые было установлено влияние поля массовых инерциальных сил на гидродинамику и процессы переноса тепла и импульса в таких потоках (1958 - 1959 гг.). Установленные закономерности позволяли разработать эффективную систему охлаждения мощных турбогенераторов.

В 1960 г. в ЭНИИ им создана первая в нашей стране аэродинамическая вакуумная установка, позволившая моделировать условия полета различных космических объектов на больших высотах, где размеры аппаратов соизмеримы с длиной свободного пробега молекул воздуха. На этой установке им проведены фундаментальные экспериментальные исследования и открыты законы теплообмена и сопротивления тел в про-

межуточной области механики разреженного газа. Является автором ряда математических моделей процессов обтекания и теплообмена тел в разреженном газе. Результаты этих работ, выполненных им с 1960 по 1975 г., были использованы при создании тепловой защиты космических аппаратов, разработке методов расчета уникальных высокопроизводительных криоконденсационных и криоадсорбционных вакуумных насосов, создании крупнейшего в мире имитатора космического пространства для тепловакуумных испытаний космических объектов с человеком на борту. Им была решена одна из важнейших проблем при создании такого имитатора – обеспечение безопасности людей при его аварийной разгерметизации.

Работая в Академии ГПС МВД России, он основал новое научное направление в пожарно-технических исследованиях - математическое моделирование пожаров в помещениях различных объектов. Он является создателем интегрального метода термодинамического анализа пожара в помещении, позволившего прогнозировать динамику опасных факторов пожара (ОФП). Им предложено рассматривать пожар в помещении как квазиравновесный процесс изменения состояния открытой термодинамической системы, которую представляет собой среда внутри помещения, взаимодействующей одновременно тремя способами обмена энергией с внешней средой, состоящей из ограждений и наружной атмосферы. Интегральная математическая модель пожара была им полностью разработана в середине 70-х гг. прошлого столетия. Совместно со своими учениками он является автором первых зонных и полевых (дифференциальных) моделей пожара. В рамках этого научного направления Ю. А. Кошмаров создал международную школу, которую сейчас составляют десятки его учеников и последователей. Результаты работ этого научного направления широко используются в практике ГПС. Они вошли в новый государственный стандарт “Пожарная безопасность” (1991 г.), ряд нормативных документов, применяются при экспертизе пожаров, проектов и т. д. Он создал методы гидравлических и теплофизических расчетов универсальных гидроэлеваторов, применяемых при пожаротушении, а также ряда струйных установок пожаротушения с использованием порошков, двуокиси углерода и комбинированных огнетушащих составов. Совместно со своими учениками он установил закономерности теплообмена на открытой поверхности разных горючих жидкостей и лаков, обтекаемых турбулентным потоком воздуха, и разработал систему мероприятий по снижению пожаровзрывобезопасности ряда технологических процессов.

Он подготовил для России, стран СНГ, Польши, Болгарии, Словакии, Венгрии и других стран 3 докторов и 37 кандидатов наук. Имеет 9 авторских свидетельств на изобретения. Автор 7 учебников по термодинамике, теплопередаче, пожарной профилактике систем отопления и вентиляции (написанных для Академии ГПС МВД России, МАИ, МЛТИ) и 8 монографий по механике разреженного газа, вакуумной технике, термогазодинамике и математическому моделированию пожаров в помещениях. Опубликовал в различных научных периодических изданиях в нашей стране (в журналах АН СССР и АН БССР, трудах и журналах ФГУ ВНИИПО МВД России и др.) и за рубежом (США, Англия, Германия, Югославия и др.) более 180 научных статей. Лауреат премии Минвуза СССР.

В 1996 г. Ю.А. Кошмаров был избран действительным членом (академиком) Национальной Академии наук пожарной безопасности. В 1998 г. Указом Президента Российской Федерации ему присвоено почетное звание “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”. Имеет правительственные награды России, Польши, Словакии, Венгрии и других стран.

Академик Российской Академии наук

А.И. Леонтьев

Доктор технических наук

А. В. Матюшин

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Общие сведения о методах прогнозирования опасных факторов пожара в помещении	7
Глава 1. Интегральная математическая модель пожара в помещении.....	14
1.1. Исходные положения и основные понятия интегрального метода термодинамического анализа пожара	14
1.2. Дифференциальные уравнения пожара	25
Глава 2. Дополнительные уравнения интегральной математической модели пожара для расчета расходов уходящих газов и поступающего через проемы воздуха	30
2.1. Исходные положения	30
2.2. Распределение давлений по высоте помещения	31
2.3. Плоскость равных давлений и режимы работы проема.....	33
2.4. Распределение перепадов давлений по высоте помещения	35
2.5. Формулы для расчета расхода газа, выбрасываемого через прямоугольный проем	37
2.6. Формулы для расчета расхода воздуха, поступающего через прямоугольный проем	38
2.7. Влияние ветра на газообмен	40
Глава 3. Дополнительные уравнения интегральной модели пожара для расчета теплового потока в ограждения и скорости выгорания горючих материалов.....	41
3.1. Приближенная оценка величины теплового потока в ограждения	41
3.2. Эмпирические методы расчета теплового потока в ограждения	42
3.3. Полуэмпирические методы расчета теплового потока в ограждения	45
3.4. Методы расчета скорости выгорания горючих материалов и скорости тепловыделения	47
Глава 4. Математическая постановка и методы решения задачи о прогнозировании ОФП на основе интегральной математической модели пожара в помещении	52
4.1. Классификация интегральных моделей пожара	52
4.2. Интегральная математическая модель пожара для исследования динамики ОФП и ее численная реализация	54
4.3. Интегральная математическая модель начальной стадии пожара и расчет критической продолжительности пожара	57
4.3.1. Постановка задачи и ее решение.....	57
4.3.2. Расчет критических значений средних параметров состояния среды в помещении.....	69

4.3.3. Расчет коэффициента теплопоглощения (коэффициента теплопотерь) при определении критической продолжительности пожара.....	71
Глава 5. Зонная математическая модель пожара в помещении	81
Глава 6. Дифференциальные (полевые) математические модели пожара в помещении.....	88
Заключение.....	94
Литература.....	95
Приложение.....	96

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 боевых 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 (восстановить) картину (ретроспективу) развития реально произошедшего пожара, т.е. "увидеть" прошлое. Это необходимо, например, при криминалистической или пожарно-технической экспертизе пожара.

Опасными факторами, воздействующими на людей и материальные ценности (согласно ГОСТ 12.1.004-91), являются:

пламя и искры;

повышенная температура окружающей среды;

токсичность продуктов горения и термического разложения;

дым;

пониженная концентрация кислорода.

С научных позиций опасные факторы пожара 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 рассеяния 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 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.

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_r , м²;

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

мощностью тепловыделения $Q_{\text{пож}}$, Вт; $Q_{\text{пож}} = \psi Q_{\text{Н}}^{\text{р}}$, где $Q_{\text{Н}}^{\text{р}}$ - 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 , Непер·м²·с⁻¹, где D - дымообразующая способность горючего материала, Непер·м²·кг⁻¹.

Второй опасный фактор - повышенная температура среды. Температура среды, заполняющей помещение, является параметром состояния.

Физическое содержание этого параметра рассмотрено в книге [2], он обозначается T , если используется размерность Кельвин или t , если используется размерность градусы Цельсия.

Третий 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_i , размерность - $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$. 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 , т. е.

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

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

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

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

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.

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

Вышеприведенные величины: температура среды, парциальные плотности (концентрации) токсичных газов и кислорода, оптическая плотность дыма - являются параметрами состояния среды, заполняющей по-

мещение при пожаре. Они характеризуют свойства газовой среды в помещении. Начиная с возникновения пожара в процессе его развития эти параметры состояния непрерывно изменяются во времени, т.е.

$$T = f_1(\tau), \quad \rho_1 = f_2(\tau), \quad \mu = f_3(\tau), \quad \rho_{O_2} = f_4(\tau).$$

Совокупность этих зависимостей составляет суть динамики ОФП.

При рассмотрении воздействия ОФП на людей используются так называемые предельно допустимые значения (ПДЗ) 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 их количественных характеристик. Так, например, установлено, что если концентрация кислорода 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. (Руководство по борьбе за живучесть подводной лодки. - М., Воениздат, 1983.)

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 ГОСТ 12.1.004-91. Ниже они представлены в виде таблицы.

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 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.

Предельно допустимые значения ОФП

ОФП, обозначение, размерность	ПДЗ
Температура, t , °С	70
Парциальная плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$:	
кислорода ρ_1	0,226
оксида углерода ρ_2	0,00116
диоксида углерода ρ_3	0,11
хлористого водорода ρ_4	$23\cdot 10^{-6}$
Оптическая плотность дыма, μ , Непер $\cdot\text{м}^{-1}$	$2,38\cdot I_{\text{пдв}}^{-1}$ *

* $I_{\text{пдв}}$ - предельно допустимая дальность видимости, м.

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 параметров 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 является 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 по-

казатель 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 искомых 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 (ЭВМ). 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. и опубликована в 1976 г. автором этой книги (труды ВНИИПО, научные отчеты ВИПТШ). Спустя год после этой публикации была напечатана статья на эту тему японским исследователем Т. Танака (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 (Зотов Ю.С., 1988).

Первая зонная модель пожара была предложена в диссертации польского инженера Е. Воланина, выполненной под руководством проф. Ю.А. Кошмарова (Воланин Е., 1982). 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 и рядом иностранных исследователей [10]. 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.

Глава 1. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

1.1. 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.), как объект исследования есть открытая тер-

модинамическая 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. 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. Эта термодинамическая система взаимодействует также с ограждающими конструкциями путем теплообмена. Кроме того, в эту систему с поверхности горящего материала (т.е. из пламенной зоны) поступает вещество в виде газообразных продуктов горения.

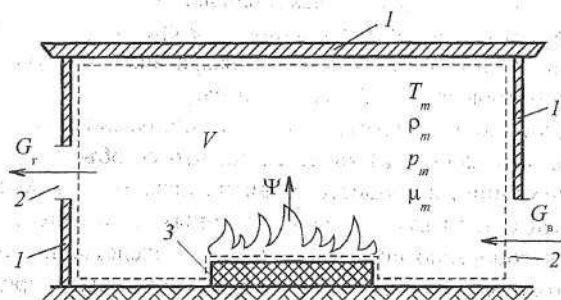


Рис. 1.1. Схема пожара в помещении:

----- контрольная поверхность; I - ограждения; 2 - проемы (окна, двери); 3 - горящий материал; G_r - расход уходящих газов; G_n - расход поступающего холодного воздуха; ψ - скорость выгорания материала

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, Н·м⁻²; ρ - локальная плотность, кг·м⁻³; R - газовая постоянная, Дж·кг⁻¹·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, коей является газовая среда в помещении, 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 средниеобъемные параметры - средниеобъемную плотность газовой среды и средниеобъемную (удельную) внутреннюю энергию.

Средниеобъемная плотность газовой среды 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

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

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

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

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 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 есть результат осреднения по объему помещения всех значений локальной парциальной плотности этого компонента, т.е.

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

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

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

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



где U - внутренняя энергия всей газовой среды, заполняющей помещение, Дж. С формальных позиций среднеобъемная внутренняя энергия газовой среды есть результат осреднения по объему всех значений локальной удельной (объемной) внутренней энергии, т.е.

$$u_m = \frac{1}{V} \int u_v dV, \quad (1.8)$$

где u_v - локальное значение удельной (объемной) внутренней энергии, Дж·м³. Локальные значения удельной объемной внутренней энергии и удельной массовой внутренней энергии 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 и локальной температурой идеального газа 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 используется параметр состояния, называемый среднеобъемным давлением. Эти два параметра в формальном отношении являются взаимозаменяемыми. Покажем это. Формулу (1.8) можно преобразовать с помощью выражений (1.9) и (1.10)

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

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

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

где p - локальное давление, Н·м⁻²; $k = \frac{c_p}{c_v}$ - 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:

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

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

$$p_m = \frac{1}{V} \int p dV, \quad (1.14)$$

где p_m - среднеобъемное давление, Н·м⁻².

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

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

Из последней формулы следует, что среднеобъемное давление прямо пропорционально среднеобъемной внутренней энергии. 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 среднемассовой температурой газовой среды, т.е.

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

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

$$P_m = \rho_m R T_m. \quad (1.19)$$

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 среднемассовая 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 уравнени-

ем состояния (1.19), которое преобразуем с помощью формулы (1.4) и уравнения Клапейрона (1.1):

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

где T - локальная температура, К. С учетом того, что $\frac{p}{P_m} \approx 1$, уравнение (1.21) 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 следующим 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 $dV = F_{\text{пол}} dy$, 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:

$$T_m = \frac{1}{h} \int_0^h T dy. \quad (1.26)$$

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 среднemasсовой 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, опубликованным в книге [2], 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. Не существенным 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 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 $0,2 \pm 1$ 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.

$$\mu_m = \frac{S}{V}, \text{ Нп} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (1.29)$$

где S - оптическое количество дыма, Нп·м²; μ_m - среднееобъемная оптическая плотность дыма, Нп·м⁻¹. Здесь сокращением "Нп" обозначено слово "Непер". Оптическое количество дыма в помещении есть произведение средней концентрации твердых частиц на объем помещения и эффективное сечение экстинкции, т.е.

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

где N - средняя концентрация частиц, т.е. число частиц, приходящееся на единицу объема, м⁻³; 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:

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

где $l_{\text{вид}}$ - дальность видимости, м.

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

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

где D - дымообразующая способность ГМ, Нп·м²·кг⁻¹; J - число частиц, образующихся при сгорании единицы массы горючего материала, кг⁻¹; χ - эффективное сечение экстинкции частиц, м².

1.2. 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 в 1976 г. проф. Ю.А. Кошмаровым (см. статью "Развитие пожара в помещении" в научном сборнике ВНИИПО МВД СССР "Горение и проблемы тушения пожаров". М.: ВНИИПО МВД СССР, 1977).

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" (М., ВИПТШ МВД СССР, 1987). 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 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 . Введем следующие обозначения:

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

б) $G_{\text{г}}$ - расход газов, покидающих помещение через проемы в рассматриваемый момент времени, кг/с;

в) ψ - скорость выгорания (скорость газификации) горючего материала в рассматриваемый момент времени, кг/с;

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_r , 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:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = G_b + \psi - G_r, \quad (1.33)$$

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 (1.33) 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:

$$\frac{d}{d\tau}(\rho_1 V) = x_{1b} G_b - x_1 n_1 G_r - \psi L_1 \eta. \quad (1.34)$$

Уравнение баланса токсичного продукта горения:

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

Уравнение баланса оптического количества дыма:

$$\frac{d}{d\tau}(\mu_m V) = D\psi - \frac{\mu_m n_3}{\rho_m} G_r - k_c F_w. \quad (1.36)$$

В этих уравнениях использованы следующие обозначения: 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, $\text{Нп}\cdot\text{м}^{-1}$.

В правой части уравнения (1.34) - уравнения баланса массы кислорода - использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения:

$x_{1в}$ - 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), кг/кг; η - коэффициент полноты сгорания; n_1 - коэффициент, учитывающий отличие концентрации кислорода в уходящих газах от среднеобъемной концентрации кислорода.

В правой части уравнения (1.35) - уравнения баланса токсичного продукта горения - использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения: L_2 - стехиометрический коэффициент для продукта горения (количество продукта горения, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала), кг/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.

В правой части уравнения (1.36) - уравнения баланса оптического количества дыма - использованы, кроме ранее указанных, следующие обозначения: 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), м²; k_c - коэффициент седиментации частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций, Нп·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 всего сказанного получается следующее уравнение энергии пожара:

$$\frac{1}{(k-1)} \frac{d}{d\tau} (p_m V) = \eta Q_n \psi + i_r \psi + c_m T_m G_n - c_p T_m m G_r - Q_w. \quad (1.37)$$

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. Здесь величина i_r - энтальпия этих продуктов. 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 работы выталкивания, которую совершает рассматриваемая термодинамическая система. Пятый член представляет собой тепловой поток, поглощаемый ограничивающими конструкциями и излучаемый через проемы.

Представленные выше 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 (1.19).

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

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

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 допол-

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

$$\frac{d}{dt}(\rho_m V) = G_{\text{в}} + \psi - G_{\text{г}} + G_{\text{ов}}, \quad (1.40)$$

где $G_{\text{ов}}$ - массовый расход подачи огнетушащего вещества, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$. Соответственно изменяются в этом случае и остальные дифференциальные уравнения пожара (см. работу [3]).

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_n^p , стехиометрические коэффициенты L_1, L_2 , дымообразующая способность D , энтальпия продуктов газификации i_n)*. 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 $G_{\text{в}}$ и уходящих через проемы газов $G_{\text{г}}$, 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.

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.

* База данных типовой горючей нагрузки, созданная во ВНИИПО МВД России, представлена в приложении.

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 такого, например, типа: "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.

Здесь лишь 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 здесь вопрос.

Глава 2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА ДЛЯ РАСЧЕТА РАСХОДОВ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ И ПОСТУПАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ ПРОЕМЫ ВОЗДУХА

2.1. Исходные положения

При пожаре происходит газообмен помещения с окружающей средой через проемы различного назначения (окна, двери, технологические отверстия и т.д.) [7].

Побудителем движения газа через проемы является перепад давлений, т.е. разность между давлением внутри помещения и давлением в окружающей атмосфере. Перепад давлений обусловлен тем, что при пожаре плотность газовой среды внутри помещения существенно отличается от плотности наружного воздуха. Кроме того, необходимо учитывать влияние ветра на величину этого перепада. Дело в том, что наружное давление на наветренной стороне здания выше, чем наружное давление на подветренной стороне.

Рассмотрим условия, когда ветер отсутствует.

2.2. Распределение давлений по высоте помещения

Чтобы определить перепады давлений в проеме, прежде всего необходимо установить законы распределения давлений по вертикали (по высоте) снаружи и внутри помещения. Будем использовать в математических выкладках обозначения, которые указаны на рис. 2.1.

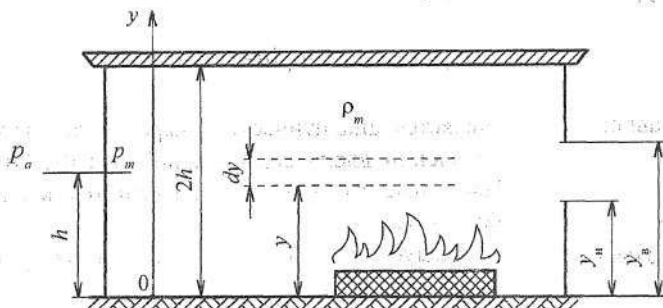


Рис. 2.1. Схема помещения:

$0y$ - координатная ось с началом отсчета на поверхности пола; $2h$ - высота помещения, м; y - координата, отсчитываемая от плоскости пола, м; dy - расстояние между двумя параллельными близко расположенными горизонтальными плоскостями, м; y_n - координата нижнего края проема, м; y_b - координата верхнего края проема, м; ρ_m - среднееобъемная плотность среды внутри помещения, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; p_a - наружное давление в окружающей атмосфере на высоте, равной половине высоты помещения, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$; p_m - среднееобъемное давление, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$

Отметим, что во всех точках снаружи помещения, т.е. в области $0 \leq y \leq 2h$, плотность наружного воздуха практически одинакова и равна ρ_a . Изменение давления с высотой в наружном воздухе описывается дифференциальным уравнением гидростатики, которое при указанном условии имеет следующий вид:

$$dp_{\text{нар}} = -g\rho_a dy, \quad (2.1)$$

где g - ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$; $p_{\text{нар}}$ - абсолютное давление во внешней атмосфере, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$. Обозначим давление снаружи на высоте, равной половине высоты помещения (т.е. при $y = h$), символом p_a .

Для того чтобы установить закон распределения давлений снаружи помещения, проинтегрируем дифференциальное уравнение (2.1). При этом правую часть этого уравнения проинтегрируем в пределах от $y = h$ до те-

кущего значения координаты y , а левую часть соответственно в пределах от p_a до $p_{нар}$. В результате интегрирования получим следующее уравнение:

$$p_{нар} - p_a = -g\rho_a(y - h). \quad (2.2)$$

Из уравнения (2.2) следует

$$p_{нар} = p_a + g\rho_a(h - y). \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) является аналитическим выражением закона распределения наружных давлений вдоль вертикальной оси Oy . Этот закон формулируется так: "Наружные давления распределяются вдоль вертикальной оси Oy по линейному закону".

Из уравнения (2.3) следует, что наружное давление на уровне пола (т.е. при $y = 0$) составляет величину, равную

$$p_{нар}(y = 0) = p_a + g\rho_a h, \quad (2.4)$$

а наружное давление на уровне потолка составляет величину, равную

$$p_{нар}(y = 2h) = p_a - g\rho_a h. \quad (2.5)$$

Закон распределения давлений по вертикали внутри помещения устанавливается аналогичным образом. При этом делается одно допущение. Суть его в том, что плотность газовой среды в помещении во всех точках, т.е. в области $0 \leq y \leq 2h$, принимается одинаковой и равной среднеобъемному значению ρ_m . Изменение давления с высотой внутри помещения описывается дифференциальным уравнением гидростатики, которое с учетом указанного допущения имеет следующий вид:

$$dp_{вн} = -g\rho_m dy, \quad (2.6)$$

где $p_{вн}$ - давление внутри помещения, Н·м⁻²; ρ_m - среднеобъемная плотность газовой среды в помещении, кг·м⁻³.

Для того чтобы установить закон распределения давлений вдоль оси Oy внутри помещения, проинтегрируем уравнение (2.6). При этом правую часть этого уравнения проинтегрируем в пределах от $y = h$ до текущего

значения координаты y , а левую часть соответственно в пределах от $p_{\text{вн}}(h)$ до $p_{\text{вн}}$, где $p_{\text{вн}}(h)$ - давление внутри помещения на высоте $y = h$. В результате получим следующее аналитическое выражение закона распределения давлений внутри помещения:

$$p_{\text{вн}} = p_{\text{вн}}(h) + g\rho_m(h - y). \quad (2.7)$$

Закон распределения давлений внутри помещения формулируется следующим образом: "Давление внутри помещения распределяется вдоль вертикальной оси Oy по линейному закону".

Так как распределение внутри помещения является линейным, давление на высоте $y = h$ равно среднеобъемному значению давлений. Действительно:

$$p_m = \frac{1}{V} \int_V p_{\text{вн}} dV = \frac{1}{2h} \int_0^{2h} p_{\text{вн}} dy = p_{\text{вн}}(h),$$

где $V = F_{\text{пол}} 2h$; $dV = F_{\text{пол}} dy$; $F_{\text{пол}}$ - площадь пола.

С учетом сказанного закон распределения давлений внутри помещения окончательно записывается следующим образом:

$$p_{\text{вн}} = p_m + g\rho_m(h - y). \quad (2.8)$$

2.3. Плоскость равных давлений и режимы работы проема

Установленные законы распределения давлений внутри и снаружи помещения позволяют найти положение горизонтальной плоскости, на которой наружное давление равно давлению внутри помещения. Эту плоскость называют плоскостью равных давлений (ПРД). Положение этой плоскости определяется координатой, которую обозначают символом y_* .

Чтобы найти значение координаты ПРД, воспользуемся уравнениями (2.3) и (2.8). Положив в этих уравнениях значение координаты равным y_* и приравняв правые части этих уравнений, получим следующее выражение:

$$p_a + g\rho_a(h - y_*) = p_m + g\rho_m(h - y_*). \quad (2.9)$$

После несложных преобразований из уравнения (2.9) получается следующая формула для определения координаты ПРД:

$$y_* = h - \frac{p_m - p_a}{g(\rho_a - \rho_m)}. \quad (2.10)$$

Из формулы (2.10) следует, что положение ПРД зависит от параметров состояния газовой среды в помещении. В процессе развития пожара параметры состояния среды внутри помещения изменяются. Следовательно, в процессе развития пожара изменяется положение ПРД, т.е. изменяется значение координаты y_* .

В зависимости от расположения проемов относительно ПРД возможны три разных режима "работы" этих проемов. Если проем целиком расположен выше ПРД, то через этот проем будут только выбрасываться газы из помещения. Этот режим называется режимом "выталкивания". Если проем целиком расположен ниже ПРД, то через этот проем будет только поступать воздух из окружающей среды. Этот режим называется режимом "всасывания" воздуха. Наконец, если ПРД проходит через проем, разделяя его на две части, то в этом случае через верхнюю часть проема выталкиваются газы из помещения, а через нижнюю часть всасывается свежий воздух. Этот режим называется "смешанным". В процессе развития пожара может происходить смена режимов работы всех проемов, так как положение ПРД в течение времени изменяется.

Вышесказанное можно пояснить с помощью рис. 2.2. На этом рисунке дана схема помещения с тремя проемами, расположенными в трех уровнях. Рядом со схемой помещения представлена эпюра давлений, которая соответствует условиям в некоторый момент процесса развития пожара. Распределения давлений внутри и снаружи помещения изображаются отрезками прямых линий в соответствии с вышеустановленными законами (2.3) и (2.8). Угол наклона линии, изображающей распределение наружных давлений, больше, чем угол наклона линии, изображающей распределение давлений внутри помещения, потому что при пожаре плотность среды внутри помещения меньше плотности наружного воздуха, т.е. $\rho_m < \rho_a$. В точке, где эти линии пересекаются, расположена ПРД. Этому положению ПРД соответствует координата y_* . На всех уровнях, расположенных выше ПРД, внутреннее давление больше наружного. Разность этих давлений на эпюре изображена стрелками, направленными "из помещения". На всех уровнях, расположенных ниже ПРД, внутреннее давление меньше наружного. Разность этих давлений изображена на эпюре стрелками, направленными "в помещение".

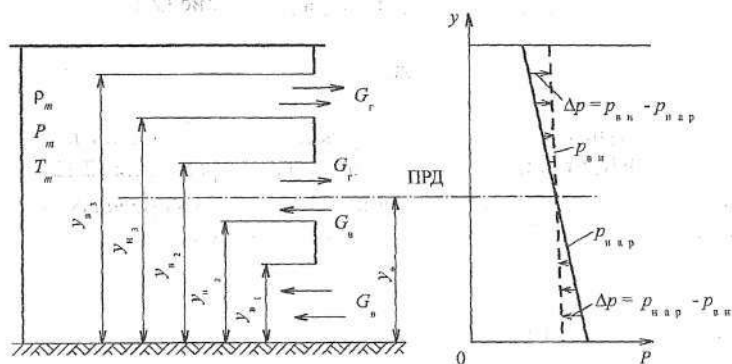


Рис. 2.2. Схема помещения с тремя проемами, расположенными в трех уровнях, и эпюра давлений:

y_* - координата ПРД; p_m, ρ_m, T_m - соответственно средние параметры состояния газовой среды в помещении в фиксированный момент процесса развития пожара;

— - распределение наружных давлений $p_{нар}$ по координате y ; --- - распределение давлений внутри помещения $p_{вн}$ по координате y . Стрелками, расположенными в проемах, показано направление движения газов и воздуха

При указанном на рис. 2.2 расположении ПРД через весь проем, находящийся выше ПРД, будет иметь место только выброс газов из помещения. В то же время через проем, целиком расположенный ниже ПРД, будет иметь место только поступление свежего воздуха в помещение. Средний проем при этом будет работать в смешанном режиме.

2.4. Распределение перепадов давлений по высоте помещения

Разность между наружным и внутренним давлениями на разной высоте может быть различна. Другими словами, перепад давлений изменяется с высотой.

Рассмотрим сначала область, лежащую выше ПРД. На высоте, соответствующей координате y (см. рис. 2.2), разность давлений определим с помощью уравнений (2.3) и (2.8). Из этих уравнений следует

$$\Delta p = p_{вн} - p_{нар} = (p_m - p_a) + g(\rho_m - \rho_a)(h - y), \quad (2.11)$$

где Δp - перепад давлений в области $y > y_*$.

Изменение этой разности давлений при увеличении высоты на малую величину dy получим, дифференцируя уравнение (2.11):

$$d(\Delta p) = -g(\rho_m - \rho_a)dy. \quad (2.12)$$

Чтобы получить распределение перепадов давлений по высоте помещения над ПРД, проинтегрируем правую часть уравнения (2.12) по y в пределах от $y = y_*$ до текущего значения y , а левую - в пределах от $\Delta p = 0$ (так как при $y = y_*$ перепад $\Delta p = 0$) до текущего значения Δp

$$\Delta p = \int_{y_*}^y g(\rho_a - \rho_m)dy = g(\rho_a - \rho_m)(y - y_*). \quad (2.13)$$

В области, лежащей ниже ПРД, распределение перепадов давлений определяется аналогичным образом. Перепад давлений в этой области определяется как разность наружного и внутреннего давлений, т.е.

$$\delta p = p_{\text{нар}} - p_{\text{вн}}, \quad (2.14)$$

где δp - перепад давлений в области $y < y_*$.

После математических операций, аналогичных использованным выше, получается следующая формула, описывающая распределение перепадов давлений по высоте помещения под ПРД (т.е. в области $y < y_*$):

$$\delta p = -g(\rho_a - \rho_m)(y_* - y). \quad (2.15)$$

Знак "минус" перед правой частью в уравнении (2.15) означает, что перепад давлений δp действует в направлении, противоположном перепаду давлений Δp .

Абсолютное значение перепада давлений ниже ПРД определяется по формуле

$$|\delta p| = g(\rho_a - \rho_m)(y_* - y). \quad (2.15a)$$

2.5. Формулы для расчета расхода газа, выбрасываемого через прямоугольный проем

Если проем целиком расположен выше ПРД, то через все участки этого проема происходит истечение газа из помещения. Скорость газа зависит от перепада давлений (уравнение Бернулли):

$$W_r = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_m}} \quad (2.16)$$

Подстановка в это уравнение вместо Δp выражения (2.13) дает формулу, позволяющую рассчитать распределение скоростей по высоте проема:

$$W_r = \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_m)(y - y_*)}{\rho_m}} \quad (2.16a)$$

Разобьем проем по высоте на малые участки, площадь которых составляет величину $b dy$, где b - ширина проема. Расход через такой малый участок проема равен произведению площади этого участка проема на скорость истечения и на плотность истекающего газа, т.е.

$$dG_r = b dy \rho_m W_r \quad (2.17)$$

Расход газа через весь проем получим, интегрируя правую часть уравнения (2.17) по высоте проема, т.е.

$$G_r = \int_{y_n}^{y_v} b \rho_m W_r dy, \quad (2.18)$$

где y_n - координата нижнего края проема, м; y_v - координата верхнего края проема, м.

После подстановки в уравнение (2.18) выражения (2.16a) получим следующий результат:

$$G_r = b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \int_{y_n}^{y_v} (y - y_*)^{\frac{1}{2}} dy \quad (2.19)$$

В результате после интегрирования получается следующая формула для расчета расхода газа через проем при условии, когда $y_n \geq y_*$:

$$G_r = \frac{2}{3} b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \cdot \left[(y_B - y_*)^3 - (y_n - y_*)^3 \right]. \quad (2.20)$$

В том случае, когда плоскость равных давлений пересекает проем и распределяет его на две части, количество газа, выбрасываемого из проема, вычисляется также путем интегрирования выражения (2.17). Однако в этом случае интегрирование правой части уравнения (2.17) производится в пределах от y_* до y_a , т.е.

$$G_r = \int_{y_*}^{y_a} b\rho_m W_r dy. \quad (2.21)$$

Формула для расчета расхода уходящих газов через проем при смешанном режиме его работы, которая получается после интегрирования, имеет следующий вид:

$$G_r = \frac{2}{3} b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \cdot (y_a - y_*)^3. \quad (2.22)$$

2.6. Формулы для расчета расхода воздуха, поступающего через прямоугольный проем

Если проем целиком расположен ниже ПРД, то через все участки такого проема происходит поступление свежего воздуха в помещение. Скорость втекающего воздуха зависит от перепада давлений

$$W_n = \sqrt{\frac{2|\delta p|}{\rho_a}} = \sqrt{2g \frac{(\rho_a - \rho_m)(y_* - y)}{\rho_a}}. \quad (2.23)$$

Подстановка вместо δp выражения (2.15а) дала формулу, позволяющую рассчитать распределение скоростей воздуха по высоте проема.

Расход воздуха через малый участок проема, площадь которого равна ($b dy$), составляет величину

$$dG_B = b\rho_a W_n dy = b\sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)(y_* - y)} \cdot dy. \quad (2.24)$$

Расход воздуха через весь проем, который лежит ниже ПРД, вычисляется путем интегрирования правой части уравнения (2.24) в пределах от $y = y_a$ до $y = y_n$:

$$G_a = \frac{2}{3} b \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} \cdot \left[(y - y_n)^3 - (y_a - y_n)^3 \right]. \quad (2.25)$$

В случае, когда проем работает в смешанном режиме, формула для расчета воздуха получается путем интегрирования правой части уравнения (2.24) в пределах от $y = y_a$ до $y = y_n$:

$$G_a = \frac{2}{3} b \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} \cdot (y_n - y_a)^3. \quad (2.26)$$

При выводе формул для расчетов расходов уходящих газов и поступающего воздуха влияние вязкости не учитывалось. Учет вязкости делается путем введения в правую часть всех формул множителя, называемого коэффициентом сопротивления.

Формулы для расчета G_a и G_r , которые были получены выше, применимы к любому прямоугольному проему рассматриваемого помещения. Газообмен через круглые проемы подробно рассмотрен в книге [3].

Полные расходы уходящих газов и поступающего воздуха в случае, когда помещение имеет несколько разных (по размерам и расположению) проемов, определяются путем суммирования расходов через каждый взятый в отдельности проем:

$$G_a = \sum_{i=1}^{i=z} G_{ai}, \quad G_r = \sum_{i=1}^{i=z} G_{ri},$$

где z - число проемов; G_{ai} - расход воздуха через i -й проем; G_{ri} - расход газа через i -й проем.

Вышеизложенное позволяет сделать следующий вывод. Значения расходов поступающего воздуха и уходящих газов при пожаре однозначно определяются значениями среднеемных параметров состояния газовой среды в помещении и геометрическими характеристиками проемов, т.е.

$$G_a = f_1(\rho_m, y^*, y_{ni}, y_{vi}, b_i), \quad G_{r,i} = f_2(\rho_m, y^*, y_{ni}, y_{vi}, b_i),$$

где $y_* = f_3(\rho_m, p_m)$.

При пожаре параметры состояния среды в помещении изменяются во времени. Следовательно, изменяются во времени расходы поступающего воздуха и уходящих газов. Кроме того, в процессе развития пожара могут вскрываться в определенные моменты времени 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 процесса развития пожара.

2.7. Влияние ветра на газообмен

Влияние ветра особенно заметно, если одна часть проемов расположена на наветренной стороне здания, а другая на подветренной. Дело в том, что из-за торможения потока воздуха на наветренной поверхности здания давление значительно повышается. В то же время на подветренной стороне здания в аэродинамической тени возникает область пониженного давления.

Вдали от здания распределение давлений вдоль вертикали 0у описывается формулой (2.3):

$$P_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h - y).$$

В непосредственной близости от наружной наветренной стороны здания распределение давлений описывается формулой следующего вида:

$$P'_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h - y) + K_1 \frac{\rho_a W_v^2}{2}, \quad (2.27)$$

где K_1 - первый аэродинамический коэффициент (эмпирическая величина); W_v - скорость ветра.

Распределение давлений около наружной подветренной стороны здания описывается формулой следующего вида:

$$P''_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h - y) - K_2 \frac{\rho_a W_v^2}{2}, \quad (2.28)$$

где K_2 - второй аэродинамический коэффициент (эмпирическая величина).

Распределение давлений внутри здания описывает формула (2.7).

Располагая формулами, которые описывают распределение давлений во внешней среде с учетом влияния ветра, нетрудно вычислить расходы уходящих из помещения газов и поступающего в помещение воздуха. При этом соблюдается та же самая последовательность математических выкладок (операций), которые использовались в случае, когда влияние ветра отсутствует.

Глава 3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ОГРАЖДЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Приближенная оценка величины теплового потока в ограждения

Ограждающие конструкции поглощают лишь часть той тепловой энергии, которая выделяется внутри помещения в результате горения горючих материалов. Исходя из этого очевидного факта, можно написать следующую формулу для суммарного теплового потока в ограждения:

$$Q_w = \varphi Q_{\text{пож}}, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{пож}} = \eta \psi Q_n^p$ - выделяющаяся в пламенной зоне в единицу времени тепловая энергия (скорость тепловыделения), Вт; φ - коэффициент, представляющий собой долю поглощенного тепла от выделившегося (коэффициент теплопоглощения). В ГОСТ 12.1.004-91 "Пожарная безопасность. Общие требования" этот коэффициент называется коэффициентом теплопотерь; Q_w - суммарный тепловой поток в ограждения (стены, потолок, пол), Вт, т.е.

$$Q_w = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{пол}}.$$

Исследования пожаров показали, что доля поглощенного тепла, т.е. коэффициент φ , не является "универсальной" константой. Значение этого коэффициента зависит от большого числа параметров (размеров помещения, количества горючего материала, свойств ограждений и др.), и, кроме того, изменяется во времени по мере развития пожара, т.е. этот коэффициент является функцией времени τ . Для того чтобы установить вид этой функции, необходимо знать зависимости от времени развития пожара теп-

лового потока Q_w и скорости тепловыделения $Q_{\text{пож}}$. Эти зависимости можно установить, обращаясь к теории теплообмена и горения.

Экспериментальные исследования разных пожаров и их различных стадий развития показали, что доля поглощенного конструкциями тепла от выделяемого может составлять от 0,2 до 0,75 ("Термогазодинамика пожаров в помещениях" / Под ред. Ю.А. Кошмарова, - М., Стройиздат, 1988, 121 с.). При приближенных оценках опасных факторов пожара в некоторых случаях используют допущения о постоянстве величины φ . Такое допущение приемлемо, если рассматривается достаточно малый интервал времени развития пожара. Например, в рекомендациях "Расчет необходимого времени эвакуации людей из помещений при пожаре" (М., ВНИИПО МВД СССР, 1989) принималось, что $\varphi = 0,6$.

Методы расчета тепловых потоков в ограждающие конструкции основываются на результатах экспериментальных исследований. Эти методы можно разделить на две группы - эмпирические и полуэмпирические.

3.2. Эмпирические методы расчета теплового потока в ограждения

Эти методы целиком и полностью базируются на эмпирических формулах, которые представляют собой зависимость теплового потока от средней температуры газовой среды в помещении или от времени.

Применение эмпирических формул ограничивается условиями, при которых велись исследования теплообмена при пожаре (к этим условиям относятся вид и количество горючего материала, число и размеры проемов, свойства материала ограждений, размеры помещений и др.).

Первую группу таких формул представляют зависимости, полученные на основании результатов исследований М.П. Башкирцева:

при $T_0 < T_m < 333 \text{ К}$

$$Q_w = \alpha_1 F [a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0)^2]^{\frac{1}{4}}; \quad (3.2)$$

при $T_m \geq 333 \text{ К}$

$$Q_w = \alpha_2 F [a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0)^2] \exp[n(T_m - T_0)], \quad (3.3)$$

где $\alpha = 0,8 \text{ К}^{-1}$; $\alpha_1 = 4,07 \text{ Вт/м}^2$; $\alpha_2 = 11,6 \text{ Вт/м}^2$; $b_1 = 0,00065 \text{ К}^{-2}$; $n = 0,0023 \text{ К}^{-1}$; $F = F_{\text{ст}} + F_{\text{пот}} + F_{\text{пол}}$ - суммарная площадь поверхностей ограждений (стен потолка, пола), м^2 ; T_m - средняя температура газовой сре-

ды; T_0 - температура среды перед пожаром; Q_w - суммарный тепловой поток в ограждения, Вт.

Эти формулы были получены на основе исследования пожаров в помещениях объемом от 2,5 до 6000 м³ с ограждающими конструкциями из кирпича и бетона. В опытах сжигались горючие жидкости (дизельное топливо, бензин, спирты).

Позднее под руководством проф. Ю.А. Кошмарова адъюнктами С.И. Зерновым, В.С. Козловым и В.С. Агаповым были проведены исследования пожаров в помещении объемом $V = 200$ м³ с ограждениями из кирпича и бетона. В опытах сжигались древесина и органическое стекло. Полученная при этом зависимость для определения потоков тепла Q_w дает результаты, близкие к тем, которые следуют из вышеприведенных формул.

Вторая группа эмпирических формул для расчета тепловых потоков в ограждения была получена И.С. Молчадским. Эти формулы позволяют вычислить тепловые потоки отдельно в вертикальные стены, потолок (перекрытие) и пол. Суммарный тепловой поток есть сумма потоков тепла в стены, потолок и пол, т.е.

$$Q_w = Q_{ст} + Q_{пот} + Q_{пол}, \quad (3.4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Q_{ст} &= \alpha_{ст} F_{ст} (T_m - T_0), \\ Q_{пот} &= \alpha_{пот} F_{пот} (T_m - T_0), \\ Q_{пол} &= \alpha_{пол} F_{пол} (T_m - T_0), \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где $\alpha_{ст}$, $\alpha_{пот}$, $\alpha_{пол}$ - средние коэффициенты теплоотдачи соответственно для стен, потолка и пола, кВт·м⁻²·К⁻¹; T_m - среднеобъемная температура среды, К; T_0 - начальная температура, К.

Значения приведенных коэффициентов теплоотдачи вычисляются по эмпирическим формулам:

$$\alpha_{ст} = 0,0159G^{0,222}, \quad (3.6)$$

$$\alpha_{пот} = \frac{0,0172G^{0,222}}{1 - 0,127G^5 e^{-1,6G}}, \quad (3.7)$$

$$\alpha_{пол} = 0,0111G, \quad (3.8)$$

где

$$G = \frac{M}{F_{\text{ст}} + F_{\text{пот}} + F_{\text{пол}}},$$

G - количество (масса) горючего материала, приходящегося на 1 м^2 суммарной площади поверхностей всех ограждающих конструкций (удельная горючая нагрузка), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$; M - масса горючего материала, находящегося в помещении, кг .

Приведенные здесь формулы были установлены на основе данных, полученных при исследовании пожаров в помещениях объемом от 60 до 200 м^3 с ограждениями из бетона и кирпича. В опытах сжигалась древесина ($G = 0,8 \div 11 \text{ кг/м}^2$). Более подробные сведения об этих опытах приведены в работе [3].

Третью группу эмпирических формул представляют зависимости тепловых потоков в стены, потолок и пол от времени:

$$Q_{\text{ст}} = F_{\text{ст}} q_{\text{ст}}^* \left[37 \left(\tau / \tau_{\text{ст}}^* \right)^{3,6} \exp(-3,6(\tau / \tau_{\text{ст}}^*)) \right]; \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{пот}} = F_{\text{пот}} q_{\text{пот}}^* \left[37 \left(\tau / \tau_{\text{пот}}^* \right)^{3,6} \exp(-3,6(\tau / \tau_{\text{пот}}^*)) \right]; \quad (3.10)$$

$$Q_{\text{пол}} = F_{\text{пол}} q_{\text{пол}}^* \left[37 \left(\tau / \tau_{\text{пол}}^* \right)^{3,6} \exp(-3,6(\tau / \tau_{\text{пол}}^*)) \right], \quad (3.11)$$

где $F_{\text{ст}}$, $F_{\text{пот}}$, $F_{\text{пол}}$ - площади стен, потолка и пола соответственно, м^2 .

Значения величин q^* и τ^* зависят от удельной горючей нагрузки G :

$$q_{\text{ст}}^* = 3,57G^{0,75}, \quad (3.12)$$

$$q_{\text{пот}}^* = \frac{3,85G}{1 - 0,127G^5 \exp(-1,6G)}, \quad (3.13)$$

$$q_{\text{пол}}^* = 2,5G^{0,75}, \quad (3.14)$$

$$\tau_{\text{стен}}^* = 26 - 5,1G^5 \exp(-1,6G), \quad (3.15)$$

$$\tau_{\text{пот}}^* = 26 - 7,2G^5 \exp(-1,6G), \quad (3.16)$$

$$\tau_{\text{пол}}^* = \tau_{\text{ст}}^*$$

где

$$G = \frac{M}{F_{\text{ст}} + F_{\text{пот}} + F_{\text{пол}}}$$

3.3. Полуэмпирические методы расчета теплового потока в ограждения

При пожаре имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен на поверхностях ограждений. Полуэмпирические формулы получены с помощью теории пограничного слоя. Для развитой стадии пожара они были получены д-ром техн. наук Молчадским И. С. методом, который основывается на использовании интегральных уравнений пограничного слоя. Формулы для расчета средних коэффициентов теплоотдачи (подробности даны в книге "Термодинамика пожаров в помещении" под ред. Ю.А. Кошмарова) имеют следующий вид:

для вертикальных поверхностей высотой H

$$\alpha_{\text{ст}} = 0,2 \frac{\lambda}{H} (\text{GrPr})^{\frac{1}{4}} \left[\frac{\text{Pr}^{\frac{2}{3}}}{2,14(1+N) + \text{Pr}^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{1}{4}} (1+N); \quad (3.17)$$

для горизонтальных поверхностей (потолок, пол)

$$\alpha_{\text{пот}} = 1,4 \frac{\lambda}{r} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \sqrt{\text{Re}} + 13,3 \frac{\delta_0 T_w^3}{\text{Bu}}; \quad (3.18)$$

$$\alpha_{\text{пол}} = 0,7 \alpha_{\text{ст}}, \quad (3.19)$$

где $\text{Gr} = \frac{g\beta(T_m - T_w)H^3}{\nu^2}$ - число Грасгофа; $\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ - число Прандтля; $N = f(T_w)$ - аналог числа Кирпичева, характеризующего соотношение радиационного и кондуктивного тепловых потоков; Bu - аналог числа Бутера, характеризующего оптическую плотность среды; Re - число Рейнольдса; T_w - температура поверхности ограждения.

Для того чтобы определить с помощью формул (3.17 - 3.19) тепловой поток в ограждающую конструкцию, необходимо знать температуру

поверхности ограждающей конструкции T_w . Температуру T_w можно определить путем решения дифференциального уравнения теплопроводности. Температура поверхности T_w зависит не только от условий теплоотдачи (т. е. от величины коэффициента теплоотдачи), но и от толщины конструкции, а также от теплофизических свойств материала конструкции.

Математически задача об определении T_w формулируется так:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (3.20)$$

начальное условие: $t = t_0$ при $\tau = 0$;

$$\left. \begin{aligned} t_w = t_m + \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0}; \\ \alpha_{\text{вн}} (t_{w_2} - t_{\text{вн}}) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

где t_w - температура на внутренней поверхности ограждений, $t_w = T_w - 273$, К; t_{w_2} - температура ограждений на внешней стороне; a , λ - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала ограждения; Δ - толщина ограждения; τ - время; x - координата, отсчитываемая от внутренней поверхности ограждения.

После того как вычислены коэффициент теплоотдачи для ограждающей конструкции α и температура внутренней поверхности ограждения T_w , определяем тепловой поток в это ограждение по формуле

$$Q = F\alpha(T_m - T_w).$$

Суммарный поток тепла Q_w получают суммированием потоков во все конструкции.

Следует отметить, что температура среды в помещении заранее неизвестна. Следовательно, задача о нагревании ограждения (об отыскании T_w) должна решаться совместно с основной системой дифференциальных уравнений интегральной математической модели пожара (ИММП).

3.4. Методы расчета скорости выгорания горючих материалов и скорости тепловыделения

Скорость выгорания твёрдых и жидких материалов есть скорость поступления летучих веществ с поверхности горючих материалов (ГМ) в пламенную зону (в пламя). Следует отметить, что летучие вещества есть горючие газы, которые образуются в результате термического разложения твердых ГМ (этот процесс называют пиролизом) или в результате испарения жидких ГМ. Следовательно, скорость выгорания твёрдых и жидких материалов есть величина, равная расходу горючих газов, поток которых с поверхности ГМ возникает в результате процессов термического разложения или испарения. Скорость выгорания обозначается буквой ψ , имеет размерность кг/с. Скорость выгорания на единицу поверхности воспламенившихся твёрдых и жидких ГМ называют массовой скоростью выгорания (иногда удельной массовой скоростью выгорания). Эту величину обозначают $\psi_{уд}$, её размерность кг/(м²·с).

Очевидно, что $\psi = \psi_{уд} F_G$, где F_G - площадь поверхности ГМ, охваченной пламенем (В. Т. Монахов, 1963 г.).

Следует отметить, что и пиролиз, и испарение являются процессами, сопровождающимися затратами (поглощением) тепловой энергии. Энергетическими характеристиками этих процессов являются теплота испарения $Q_{гж}^{исп}$ и теплота газификации (пиролиза) $Q_{гм}^{пир}$. Примеры: теплота испарения $Q_{бензина}^{исп} = 490$ кДж/кг; $Q_{спирта}^{исп} = 1000$ кДж/кг; теплота пиролиза $Q_{дерева}^{пир} = 1800$ кДж/кг. Значения $Q_{гж}^{исп}$ и $Q_{гм}^{пир}$ зависят от природы горючего вещества, т.е. для разных веществ они различны.

Из сказанного следует, что величина массовой скорости выгорания, т.е. $\psi_{уд}$, зависит от природы ГМ. Это утверждение относится только к твёрдым и жидким ГМ. Если ГМ представляет собой газообразное вещество (метан, пропан и т.д.), поступающее в помещение из отверстий в стенках трубопроводов или аппаратов, то скорость выгорания этого газа равна его расходу из отверстий и не зависит от природы этого газа.

Массовая скорость выгорания ψ зависит не только от свойств горючего материала. Скорость выгорания вещества в помещении может отличаться от его скорости выгорания и тепловыделения на открытом пространстве. Возможны два предельных режима горения материала в помещении.

Первый режим выгорания горючих материалов характеризуется наличием достаточного количества кислорода (воздуха). При таком режиме

горение материала в помещении аналогично горению его на открытом воздухе. Режим пожара в этом случае называют пожаром, регулируемым нагрузкой (ПРН).

Второй предельно возможный режим выгорания горючего материала характеризуется тем, что кислорода в помещении мало и скорость тепловыделения лимитируется количеством поступающего извне кислорода (воздуха). Режим пожара в этом случае называют пожаром, регулируемым вентиляцией (ПРВ).

В реальных условиях в процессе развития пожара один режим выгорания может переходить в другой, т.е. вслед за ПРН наступает ПРВ и наоборот. Между ПРН и ПРВ имеют место промежуточные режимы.

Следует отметить, что скорость выгорания материала в определенной степени зависит от температуры газовой среды в помещении.

Скорость выгорания при ПРН вычисляется по формуле следующего вида:

$$\Psi = \Psi_{уд}^* F_r, \quad (3.22)$$

где $\Psi_{уд}^*$ - удельная скорость выгорания на открытом воздухе, кг/(с·м²); F_r - площадь горения, м².

Если горючим веществом является жидкость, площадь горения полагается равной площади ее зеркала.

Площадь горения ТГМ вычисляется на основе экспериментальных данных о линейной скорости распространения пламени. В частности, при круговом распространении используется следующая формула:

$$F_r = \pi v_n^2 \tau^2, \quad (3.23)$$

где τ - время, с; v_n - линейная скорость распространения пламени по поверхности пожарной нагрузки, м/с.

Формула (3.23) применима лишь до момента времени, вычисляемого по формуле

$$\tau_n = \frac{m_F}{\Psi_{уд}^*}, \quad (3.24)$$

где m_F - масса ТГМ, приходящаяся на единицу поверхности пола.

После этого момента времени в центре круга окажется площадка, где горение прекратилось из-за отсутствия горючего материала. Тогда площадь горения вычисляется по формуле

$$F_r = \pi v_a^2 [\tau^2 - (\tau - \tau_*)^2] = \pi v_a^2 \tau_* (2\tau - \tau_*). \quad (3.25)$$

В случае, когда горючий материал расположен на прямоугольной площадке, а горение начинается в центре этой площадки, формулы (3.23) и (3.25) применимы лишь при условии

$$r = v_a \tau \leq l_{\min}, \quad (3.26)$$

где l_{\min} - меньшая сторона прямоугольника.

Если r превышает l_{\min} , то из площади круга, равной πr^2 , вычитаются площади соответствующих сегментов (рис. 3.1).

Входящие в формулы (3.22 - 3.23) величины $\psi_{уд}^*$ и v_a определяются в основном свойствами горючей нагрузки. Для многих видов горючей нагрузки уже имеются экспериментальные сведения об этих величинах.

При расчетах процесса выгорания твердых материалов принимается допущение о том, что при ПРН величина $\psi_{уд}^*$ остается неизменной вплоть до полного выгорания пожарной нагрузки. Однако в действительности может иметь место уменьшение скорости выгорания из-за образования на горящей поверхности материала слоя золы и угля [8].

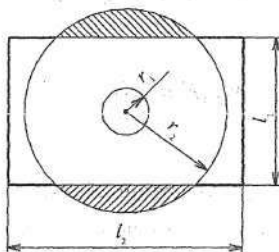


Рис. 3.1. Схема кругового распространения пламени по поверхности слоя горючего материала:

r_1 - радиус зоны горения в момент τ_1 ; r_2 - радиус зоны горения в момент $\tau_2 > \tau_1$; l_1, l_2 - стороны прямоугольника

По мере развития пожара может наступить такой режим, когда количество кислорода O_2 , поступающего в помещение с наружным воздухом через проемы, становится равным количеству, необходимому для полного сгорания (окисления) летучих веществ, поступающих с поверхности ГМ. Весь поступающий кислород расходуется для окисления выделяющихся летучих веществ (продуктов пиролиза или испарения). При таком режиме скорость выгорания считают по формуле

$$\psi = \frac{G_B x_{1B}}{L_1}, \quad (3.27)$$

где G_B - расход воздуха, поступающего в помещение через проемы, кг/с; x_{1B} - концентрация кислорода в поступающем воздухе; L_1 - стехиометрический коэффициент, т.е. количество кислорода, необходимое для сгорания 1 кг горючего материала.

Эта формула, строго говоря, позволяет определить количество прореагировавших в помещении продуктов пиролиза или испарения. Некоторая часть летучих веществ может догорать (сгорать) за проемами вне помещения.

Два режима, рассмотренные выше, являются предельными. В реальных условиях наблюдаются промежуточные режимы, приближающиеся в той или иной степени к одному из предельных. Формула, которая позволяет рассчитать скорость выгорания при любом режиме, имеет следующий вид:

$$\psi = \eta_a \psi_{уд} F_r K + (1 - K) \frac{x_{1B} G_B}{L_1}, \quad (3.28)$$

где K - функция, зависящая от среднеобъемной концентрации кислорода в помещении. На рис. 3.2 представлено графическое изображение этой функции.

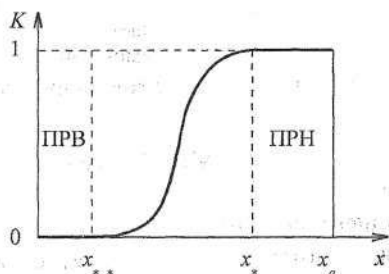


Рис. 3.2. Функция режима пожара:

x_* - начало перехода от режима ПРН к режиму ПРВ; x_* - конец перехода от режима ПРН к режиму ПРВ; x_a - концентрация кислорода во внешней атмосфере

Когда концентрация кислорода снизится и достигнет значения x_{**} , наступает режим ПРВ. При $x = x_*$ функция K должна удовлетворять следующим условиям:

а) $K = 1$;

б) $\frac{dK}{dx} = 0$. (3.29)

При $x \leq x_*$ $K = 0$.

Всем этим условиям удовлетворяет совокупность функций следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{при } z \geq 1 & \quad K = 1; \\ \text{при } 0 \leq z \leq 1 & \quad K = z^n e^{n(1-z)}; \\ \text{при } z < 0 & \quad K = 0, \end{aligned} \quad (3.30)$$

где
$$z = \frac{x - x_*}{x_* - x_{**}}. \quad (3.31)$$

В заключение следует отметить, что продолжающиеся теоретические и экспериментальные исследования процессов выгорания ГМ рано или поздно приведут к более полному пониманию сложных взаимосвязанных процессов, определяющих пиролиз ТГМ и испарение ЖГМ при пожаре в помещениях.

Скорость тепловыделения $Q_{\text{пож}}$ есть тепло, выделяющееся в результате химических реакций в пламенной зоне за единицу времени.

Значение скорости тепловыделения определяют по формуле

$$Q_{\text{пож}} = \psi \eta Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (3.32)$$

где η - коэффициент полноты сгорания ($\eta \leq 1$); $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ - теплота сгорания, Дж/кг. Значения теплоты сгорания зависят от природы ГМ (например, $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 13,8 \cdot 10^6$ Дж/кг - для дерева; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 41,8 \cdot 10^6$ Дж/кг - для бензина).

Значение η вычисляется по эмпирическим формулам, полученным в результате исследований пожаров в помещениях.

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОФП НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

4.1. Классификация интегральных моделей пожара

Термин "интегральная модель пожара" служит для обозначения целого класса моделей, отличающихся друг от друга математической постановкой задачи и, вследствие этого, методами ее решения. Общим для всех видов интегральных моделей является то, что основу каждой из них составляют дифференциальные уравнения пожара (1.34)-(1.40), содержание и вывод которых были даны в гл. 1. Как уже отмечалось, эти уравнения содержат группу величин, которые зависят, помимо всего прочего, от состояния среды, заполняющей помещение при пожаре. К таким величинам относятся массовые расходы поступающего в помещение воздуха и уходящих через проем газов, тепловой поток в ограждающие конструкции, скорость выгорания горючего материала и скорость тепловыделения (тепловая мощность очага горения). Для вычисления этих величин могут использоваться различные формулы, полученные эмпирическим или полуэмпирическим методами. Выбор той или иной разновидности формул для вычисления этих величин определяется, прежде всего, целями исследования динамики ОФП. Отличие одного вида интегральной модели пожара от других определяется используемыми в этих моделях формулами для вычисления вышеуказанных величин. Так, например, если целью исследования динамики ОФП является определение только процессов нарастания температуры, дефицита кислорода и концентрации токсичного газа, то в этом случае целесообразно использовать для вычисления

теплового потока в ограждения формулы (3.2) и (3.3). Эти эмпирические формулы представляют собой зависимость суммарного теплового потока в ограждения от среднеобъемной температуры. Если же целью исследования является изучение не только указанных процессов, но и процесса прогревания ограждающих конструкций, то в этом случае целесообразно использовать формулы (3.17), (3.18), дополняя при этом уравнения пожара уравнением теплопроводности Фурье-Кирхгофа. В этом случае решаются две сопряженные задачи - задача об изменении параметров среды в помещении и задача о нагревании ограждающих конструкций (стены, потолок, пол).

Как отдельный вид можно рассматривать интегральную модель для начальной стадии пожара [8]. Исследование начальной стадии пожара является актуальной задачей в связи с проблемой обеспечения безопасной эвакуации людей из помещения. В начальной стадии пожара практически отсутствует влияние процесса снижения концентрации кислорода на процесс выгорания горючего материала. Кроме того, если помещение имеет очень небольшую проемность (т.е. отношение площади проемов к площади пола составляет менее одного процента), то в начальной стадии в помещение не поступает извне свежий воздух и наблюдается только выталкивание газов из помещения через малые проемы и щели. Эти и другие особенности процесса развития пожара в начальной его стадии позволяют упростить дифференциальные уравнения пожара.

Следует отметить, что невозможно получить аналитическое решение полной неупрощенной системы дифференциальных уравнений пожара, дополненной формулами для расчета газообмена помещения с окружающей атмосферой и теплообмена с ограждающими конструкциями, а также скорости выгорания горючего материала и тепловыделения. В общем случае можно получить лишь численное решение этой системы дифференциальных уравнений при помощи современных компьютеров. Однако при определенных допущениях, приемлемых, например, для начальной стадии пожара, указанная система уравнений значительно упрощается, так что становится возможным аналитическое решение задачи. Полученное таким образом аналитическое решение, во-первых, является приближенным и, во-вторых, имеет ограниченную область применения.

Ниже мы рассмотрим лишь два варианта постановки задачи о прогнозировании ОФП. Вначале мы рассмотрим постановку задачи на основе полной неупрощенной системы дифференциальных уравнений пожара. Метод численного решения этой задачи разработан на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МВД России. Подробное описание этой интегральной модели и ее численной реализации

дано в учебном пособии [5]. Далее мы рассмотрим постановку задачи и ее решение применительно к начальной стадии пожара. Эта задача подробно рассмотрена в книге [8].

4.2. Интегральная математическая модель пожара для исследования динамики ОФП и ее численная реализация

Основная система дифференциальных уравнений, описывающих процесс изменения состояния среды, заполняющей помещение, имеет вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi + G_B - G_r + G_{пр} - G_{выт} + G_{ов}; \quad (4.1)$$

$$V \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_m}{k-1} \right) = (\eta Q_H^p + i_r) \psi + c_{pв} T_B (G_B + G_{пр}) - c_{pк} T_m (G_r + G_{выт}) + c_{pов} T_{ов} G_{ов} - Q_w - Q_r + Q_0; \quad (4.2)$$

$$V \frac{d\rho_1}{d\tau} = -\eta L_1 \psi + \frac{\rho_{1в}}{\rho_m} (G_B + G_{пр}) - \frac{\rho_1}{\rho_m} (G_r + G_{выт}); \quad (4.3)$$

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \eta L_2 \psi - \frac{\rho_2}{\rho_m} (G_r + G_{выт}); \quad (4.4)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = D\psi - \mu_m \left(\frac{G_r + G_{выт}}{\rho_m} \right) + k_c F_w. \quad (4.5)$$

В этих уравнениях используются те же обозначения, которые были даны ранее в гл. 1. Кроме того, уравнения содержат следующие величины: $G_{пр}$ и $G_{выт}$ - массовые расходы, создаваемые приточно-вытяжной вентиляцией, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; $G_{ов}$ - массовый расход подачи газообразного огнетушащего вещества (ОВ), $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; Q_0 - тепло, поступающее от системы отопления, Вт; Q_r - тепло, излучаемое через проемы, Вт; i_r - энтальпия продуктов газификации горючего материала, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$.

Начальные условия для дифференциальных уравнений записываются следующим образом:

$$\text{при } \tau = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_m &= \frac{P_a}{R_a T_0}; \\ \rho_2 &= 0; \\ P_m &= P_a; \\ \frac{\rho_{1a}}{\rho_m} = x_{1a} &= 0,23; \\ \mu_m &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где T_0 - начальная температура в помещении; R_a - газовая постоянная воздуха; P_a - атмосферное давление на уровне половины высоты помещения.

Дополнительные уравнения, используемые в интегральной модели пожара, имеют следующий вид:

$$P_m = \rho_m R_m T_m, \quad (4.7)$$

$$Q_w = \alpha F_w (T_m - T_w), \quad (4.8)$$

$$T_w = T_0 + 0,2(T_m - T_0) + 0,00065(T_m - T_0)^2, \quad (4.9)$$

$$\alpha = \begin{cases} = 4,073\sqrt{T_m - T_w}, & \text{при } T_m < 333\text{K}, \\ = 11,6\exp[0,0023(T_m - 273)], & \text{при } T_m \geq 333\text{K}, \end{cases} \quad (4.10)$$

$$Q_r = \varepsilon_m \sigma F_c (T_m^4 - T_a^4), \quad (4.11)$$

$$G_B = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} \sum \xi_i b_i [(y_* - y_{vi})^{1,5} - (y_* - Z_i)^{1,5}], \quad (4.12)$$

$$G_r = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \sum \xi_i b_i [(y_* - y_{vi})^{1,5} - (y_* - Z_i)^{1,5}], \quad (4.13)$$

$$y_* = h - \frac{P_m - P_a}{g(\rho_a - \rho_m)}, \quad (4.14)$$

$$\Psi = \Psi_{уд} F_r, \quad (4.15)$$

$$F_r = \pi(v_d \tau)^2, \quad \text{при } v_d \tau < l_{\min}, \quad (4.16)$$

$$\Psi_{уд} = (\Psi_{уд})_0 K - \frac{0,23(G_b + G_{пр})(1 - K)}{L_1 F_r}, \quad (4.17)$$

$$K = \left(\frac{x_1}{0,23} \right)^2 \exp \left[2 \left(1 - \frac{x_1}{0,23} \right) \right], \quad (4.18)$$

где α - коэффициент теплоотдачи; ε_m - степень черноты задымленной среды; σ - постоянная Больцмана; F_c - суммарная площадь проемов; b_i - ширина i -го проема; ξ - коэффициент сопротивления проема; y_* - координата плоскости равных давлений (ПРД), отсчитываемая от пола; y_{ni} - координата нижнего края i -го проема; y_{vi} - координата верхнего края i -го проема; h - половина высоты помещения; F_w - суммарная площадь поверхности ограждений; F_r - площадь горения; v_d - линейная скорость распространения пламени по ТГМ; $(\Psi_{уд})_0$ - удельная скорость выгорания на открытом воздухе; K - функция режима пожара; Z_i - формальный параметр, определяемый следующим образом:

$$Z_i = \begin{cases} y_{ni}, & \text{при } y_* \leq y_{ni}, \\ y_*, & \text{при } y_{ni} < y_* < y_{vi}, \\ y_{vi}, & \text{при } y_* \geq y_{vi}. \end{cases} \quad (4.19)$$

Степень черноты задымленной среды рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_m = 1 - \exp(-\lambda \mu_m l), \quad (4.20)$$

где $l = 3,6 \frac{V}{F_w}$; λ - коэффициент пересчета оптического диапазона в диапазон инфракрасных волн.

Расходы $G_{пр}$ и $G_{выт}$ вычисляются по следующим формулам:

$$G_{пр} = \rho_a W_{пр}, \quad (4.21)$$

$$G_{\text{выт}} = \rho_m W_{\text{выт}}, \quad (4.22)$$

где $W_{\text{пр}}$ и $W_{\text{выт}}$ - соответственно объемные производительности приточной и вытяжной систем. Расход огнетушащего вещества $G_{\text{ов}}$ полагается постоянным в интервале времени от момента включения системы пожаротушения до окончания запаса огнетушащих веществ и равным нулю вне этого интервала, а горючий материал расположен на прямоугольной площадке (см. рис. 3.1).

Дифференциальные уравнения (4.1) – (4.5) несколько отличаются от уравнений (1.34) – (1.38). Это обусловлено тем, что в рассматриваемой постановке задачи предполагается возможным принять следующие допущения:

$$V = \text{const}; \quad n_1 = 1; \quad n_2 = 1; \quad n_3 = 1; \quad m = 1.$$

Постановка задачи без этих допущений и компьютерная программа для численного решения ее даны в книге [3].

Кроме того, в рассматриваемой здесь постановке задачи учитывается работа приточно-вытяжной вентиляции и подача в заданный момент времени газообразного огнетушащего вещества.

Для численного решения поставленной задачи разработана компьютерная программа (для ЭВМ, начиная с IBM PC 386/387-SX/1 Mb/HDD 10 Mb, обязательно разбиение физического диска на логические). Следует отметить, что чем ниже производительность ЭВМ, тем больше время, необходимое программе для вычислений.

Для численной реализации использован метод Рунге-Кутты-Фельберга 4-5 порядка точности с переменным шагом. Подробное описание программ дано в учебном пособии [5].

4.3. Интегральная математическая модель начальной стадии пожара и расчет критической продолжительности пожара

4.3.1. Постановка задачи и ее решение

В начальной стадии пожара, возникающего в помещении с малой проемностью, наблюдается специфический режим газообмена помещения с окружающей средой. Особенности этого режима заключаются в том, что процесс газообмена идет в одном направлении через все имеющиеся проемы и щели. Поступление воздуха в помещение из окружающей среды в этот период развития пожара совсем отсутствует. Лишь спустя некоторое

время, когда средняя температура среды в помещении достигает определенного значения, процесс газообмена становится двусторонним, т.е. через одни проемы из помещения вытекают нагретые газы, а через другие поступает свежий воздух. Продолжительность начальной стадии пожара, при которой наблюдается "односторонний" газообмен, зависит от размеров проемов. В этом параграфе исследуется динамика ОФП в начальной стадии пожара при условии, когда отсутствует поступление воздуха извне. Это означает, что в дифференциальных уравнениях пожара (1.34)-(1.38) можно отбросить члены, содержащие расход воздуха, так как

$$G_b = 0. \quad (4.23)$$

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, что

$$\frac{dp_m}{dt} \cong 0; \quad \rho_m T_m = T_0 \rho_0, \quad (4.24)$$

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. По этой причине можно принять, что величины η, D, R в этой стадии пожара остаются неизменными. Кроме того, примем, что $n_1 = n_2 = n_3 = m = 1$ и $V = \text{const}$.

С учетом сказанного уравнения пожара для начальной стадии пожара в помещениях с малой проемностью принимают следующий вид:

$$V \frac{d\rho_m}{dt} = \psi - G_r, \quad (4.25)$$

$$\psi Q_u^p \eta - c_p T_m G_r - Q_w = 0, \quad (4.26)$$

$$V \frac{d\rho_l}{dt} = -\psi L_1 \eta - \frac{\rho_l}{\rho_m} G_r, \quad (4.27)$$

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \psi L_2 \eta - \frac{\rho_2}{\rho_m} G_r, \quad (4.28)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi D - \mu_m \frac{1}{\rho_m} G_r. \quad (4.29)$$

В дальнейшем принимается еще одно допущение, а именно:

$$c_p = c_{pв} = \text{const}. \quad (4.30)$$

Для того чтобы получить аналитическое решение этих уравнений, используется прием, заключающийся в следующем. Поскольку рассматривается процесс развития пожара на относительно малом промежутке времени, то можно принять, что отношение теплового потока в ограждении к тепловыделению есть величина постоянная, равная своему среднему значению на этом интервале времени, т.е.

$$\frac{1}{\tau_*} \int_0^{\tau_*} \frac{Q_w}{Q_{\text{пож}}} d\tau = \phi, \quad (4.31)$$

где $Q_{\text{пож}} = \psi \eta Q_n$; τ_* - время окончания начальной стадии пожара. Величину ϕ принято называть "коэффициентом теплотерь" (ГОСТ 12.1.004-91). В дальнейшем подробно рассмотрим метод вычисления этого коэффициента для различных схем распространения пламени по горючим материалам.

Уравнение энергии (4.26) при использовании соотношения (4.31) преобразуется:

$$Q_n \psi \eta (1 - \phi) - c_p T_m G_r = 0. \quad (4.32)$$

Из уравнения (4.32) можно получить формулу для вычисления расхода вытесняемых газов в каждый момент времени

$$G_r = \frac{\psi Q_n \eta (1 - \phi)}{c_p T_m}. \quad (4.33)$$

Эту формулу можно преобразовать, если воспользоваться условием (4.24):

$$G_r = \frac{\psi Q_H^p \eta (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m. \quad (4.34)$$

С помощью формулы (4.34) уравнения (4.25), (4.27), (4.28) и (4.29) можно преобразовать:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi \left[1 - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m \right], \quad (4.35)$$

$$V \frac{d\rho_1}{d\tau} = -\psi \eta L_1 \left[1 + \frac{Q_H^p (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 L_1} \rho_1 \right], \quad (4.36)$$

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \psi \eta L_2 \left[1 - \frac{Q_H^p (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 L_2} \rho_2 \right], \quad (4.37)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi D \left[1 - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0 D} \mu_m \right]. \quad (4.38)$$

Эти уравнения представляют собой частный случай основной (неупрощенной) системы уравнений пожара. При этом нетрудно видеть, что система уравнений "распалась". Решение каждого дифференциального уравнения можно отыскивать отдельно. Другими словами, при указанных выше условиях снимается вопрос о "совместном" решении уравнений. Каждое дифференциальное уравнение является уравнением с разделяющимися переменными.

Уравнение (4.35) можно еще более упростить, если учесть следующее обстоятельство. Второй член в прямоугольных скобках этого уравнения во много раз больше единицы, т.е.

$$\frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m \gg 1. \quad (4.39)$$

Действительно, для подавляющего большинства ГМ величина $Q_H^p > 10^7$ Дж·кг⁻¹, теплоемкость газовой среды в помещении $c_p \approx 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, произведение начальных значений плотности и температуры $\rho_0 T_0 \approx 3 \cdot 10^2$ кг·К·м⁻³, коэффициент полноты горения $\eta \approx 1$, а величина коэффициента теплопоглощения $\varphi \approx 0,5$. Если подставить значения всех указанных величин в правую часть выражения (4.39), то действительно обнаружим, что левая часть выражения (4.39) более чем на порядок превышает единицу. Это означает, что в прямоугольных скобках уравнения (4.35) можно отбросить единицу. С учетом сказанного уравнение (4.35) примет следующий вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = -\psi \frac{\eta Q_H^p (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0} \rho_m. \quad (4.40)$$

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

$$\int_{\rho_0}^{\rho_m} \frac{d\rho_m}{\rho_m} = -\frac{\eta Q_H^p (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \int_0^{\tau} \psi d\tau. \quad (4.41)$$

Интеграл в правой части уравнения (4.41) есть масса ГМ, сгоревшего к моменту времени τ , т.е.

$$\int_0^{\tau} \psi d\tau = M_{\tau}, \quad (4.42)$$

где M_{τ} - масса сгоревшего ГМ, кг. Если процесс распространения пожара по поверхности ТГМ является круговым, то функция ψ имеет следующий вид:

$$\psi = \psi_{уд} \pi v_{л}^2 \tau^2, \quad (4.43)$$

где $\psi_{уд}$ - удельная массовая скорость выгорания кг·м⁻²·с⁻¹; $v_{л}$ - линейная скорость распространения пламени по площади размещения пожарной нагрузки, м·с⁻¹. Подставляя формулу (4.43) в подинтегральное выражение формулы (4.42), получим

$$M_{\tau} = \frac{\pi}{3} \psi_{уд} v_{л}^2 \tau^3 = 1,05 \psi_{уд} v_{л}^2 \tau^3. \quad (4.44)$$

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

$$\psi = \psi_{уд} b_{г} v_{л} \tau, \quad (4.45)$$

где $b_{г}$ - ширина фронта пламени, м.

Подставляя формулу (4.45) в выражение (4.42), получаем

$$M_{\tau} = \frac{1}{2} b_{г} \psi_{уд} v_{л} \tau^2. \quad (4.46)$$

При нестационарном горении жидкости формула для вычисления сгоревшей массы жидкости имеет вид

$$M_{\tau} = \frac{2}{3} F_{г} \psi_{уд} \frac{\tau^3}{\sqrt{\tau_{ст}}}, \quad (4.47)$$

где $F_{г}$ - площадь открытой поверхности жидкости, м².

При выводе формулы (4.47) использовалась следующая зависимость для скорости выгорания ГЖ:

$$\psi = F_{г} \psi_{уд} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{ст}}}, \quad (4.48)$$

где $\psi_{уд}$ - установившаяся скорость выгорания ГЖ; $\tau_{ст}$ - время стабилизации горения ГЖ. Следует отметить, что формулы (4.47) и (4.48) применимы лишь при $\tau \leq \tau_{ст}$.

Все полученные формулы для расчета массы выгоревшего ГМ можно представить одной формулой

$$M_{\tau} = A \tau^n, \quad (4.49)$$

$$\text{где } A = \begin{cases} \frac{\pi}{3} \Psi_{\text{уд}} v_{\text{л}}^{2n} & \text{при круговом распространении пожара по ТГМ;} \\ \frac{1}{2} b_{\Gamma} \Psi_{\text{уд}} v_{\text{л}} & \text{при линейном распространении пожара по ТГМ;} \\ \frac{2}{3} F_{\Gamma} \Psi_{\text{уд}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{ст}}}} & \text{при неустановившемся горении ГЖ,} \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 3 & \text{при круговом распространении пожара по ТГМ;} \\ 2 & \text{при линейном распространении пожара по ТГМ;} \\ \frac{2}{3} & \text{при неустановившемся горении ГЖ.} \end{cases}$$

Подставляя формулу (4.49) в уравнение (4.41), получим после интегрирования левой части этого уравнения следующее выражение:

$$\ln \frac{\rho_m}{\rho_0} = -\frac{A}{B} \tau^n, \quad (4.50)$$

$$\text{где } B = \frac{c_p \rho_0 T_0 V}{\eta(1-\varphi) Q_n^p}.$$

Потенцируя выражение (4.50), получим следующую формулу, описывающую зависимость средней плотности от времени:

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right). \quad (4.51)$$

Из этой формулы с учетом соотношения (4.24) получается формула, описывающая процесс нарастания средней температуры среды в помещении

$$\frac{T_m}{T_0} = \exp\left(\frac{A}{B} \tau^n\right). \quad (4.52)$$

Теперь перейдем к рассмотрению дифференциального уравнения (4.36), описывающего процесс снижения парциальной плотности кислорода в помещении. Это уравнение с разделяющимися переменными.

Разделим переменные и далее проинтегрируем правую и левую части полученного уравнения с разделяющимися переменными, учитывая при этом ранее указанные начальные условия:

$$\int_{\rho_{01}}^{\rho_1} \frac{d\rho_1}{1 + \frac{Q_H^p(1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 L_1} \rho_1} = -\frac{\eta L_1}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau, \quad (4.53)$$

где ρ_{01} - начальное значение плотности кислорода в помещении; в ГОСТ 12.1.004-91 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 (4.53) с учетом формулы (4.49) получается выражение

$$\ln \frac{1 + \frac{(1-\varphi)Q_H^p}{c_p \rho_0 T_0 L_1} \rho_1}{1 + \frac{(1-\varphi)Q_H^p}{c_p \rho_0 T_0 L_1} \rho_{01}} = -\frac{\eta(1-\varphi)Q_H^p}{c_p \rho_0 T_0 V} A \tau^n. \quad (4.54)$$

Потенцируя выражение (4.54), получим формулу, описывающую зависимость средней парциальной плотности кислорода от времени:

$$\frac{\left(1 + \frac{V}{B\eta L_1} \rho_1\right)}{\left(1 + \frac{V}{B\eta L_1} \rho_{01}\right)} = \exp\left[-\frac{A}{B} \tau^n\right]. \quad (4.55)$$

Эту формулу можно преобразовать:

$$\rho_1 = \frac{B\eta L_1}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B\eta L_1} \rho_{01}\right) \exp\left[-\frac{A}{B} \tau^n\right] - 1 \right\}. \quad (4.56)$$

Далее перейдем к рассмотрению дифференциального уравнения (4.37), описывающего процесс изменения во времени концентрации токсичного газа в помещении. Это уравнение, как указано в работе [8], хорошо описывает процесс при условии, когда

$$\rho_2 \ll \frac{c_p T_0 L_2}{(1-\varphi) Q_H^p} \rho_0. \quad (4.57)$$

Величину, стоящую в правой части этого неравенства, можно называть "пороговой" парциальной плотностью токсичного газа. Дифференциальное уравнение (4.37) является уравнением с разделяющимися переменными.

После разделения переменных и интегрирования с учетом начального условия получим следующее выражение:

$$\ln \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_*} \right) = -\frac{A}{B} \tau^n, \quad (4.58)$$

где $\rho_* = \frac{c_p T_0 L_2}{(1-\varphi) Q_H^p} \rho_0$ - пороговая плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Потенцируя выражение (4.58), получим формулу, описывающую зависимость парциальной плотности токсичного газа от времени:

$$\rho_2 = \rho_* \left[1 - \exp \left(-\frac{A}{B} \tau^n \right) \right]. \quad (4.59)$$

Наконец рассмотрим дифференциальное уравнение (4.38), описывающее изменение критической плотности дыма в помещении. Разделим переменные в этом уравнении и затем, интегрируя с учетом начального условия, получаем следующую формулу:

$$\mu = \mu_* \left[1 - \exp \left(-\frac{A}{B} \tau^n \right) \right], \quad (4.60)$$

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

Значение μ_* зависит от свойств ГМ. Например, для древесины при ее горении на открытом воздухе $\mu_* \leq 5 \text{ Нп} \cdot \text{м}^{-1}$.

Отметим здесь еще раз, что оптическая плотность дыма связана с дальностью видимости следующим соотношением:

$$l_{\text{вид}} \approx \frac{2,38}{\mu_m \cdot (1 - \dots)}$$

Подведем итоги. В результате решения дифференциальных уравнений (4.35)-(4.38) получены формулы, позволяющие рассчитывать процессы нарастания ОФП. В силу ранее сказанного эти формулы имеют ограниченный характер. Они применимы лишь до тех пор, пока отсутствует поступление воздуха в помещение. В работе [8] показано, что это условие выполняется (соблюдается), если выполняется следующее неравенство:

$$\frac{F_{\text{пр}} \sqrt{gH}}{V} \tau \leq 5, \quad (4.61)$$

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

Полученные формулы (4.52), (4.55), (4.58) и (4.59) позволяют рассчитать критическую продолжительность пожара в помещениях, имеющих небольшие открытые в начальной стадии проемы. Вопрос о критической продолжительности пожара является ключевым в решении задачи обеспечения эвакуации людей при возникновении пожара в помещении.

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 параметры состояния - температура, концентрация кислорода и токсичных газов, дальность видимости. Изменяются также и локальные значения параметров состояния.

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. Эти значения будем называть средними критическими параметрами состояния. Так, например, если средняя температура среды достигла своего критического значения, то это значит, что в рабочей зоне температура газа достигла своего предельно допустимого значения. Вопрос о том, какая существует связь между критическими значениями средних параметров состояния и предельно допустимыми параметрами

состояния в рабочей зоне, рассмотрим в заключительной части этой главы. Здесь лишь отметим, что на основе формул, связывающих критические значения средних параметров состояния среды в помещении и предельно допустимые значения параметров состояния газовой среды в заданном месте расположения людей, можно определить критическое состояние газовой среды. После того, как значения средних критических параметров состояния будут вычислены, рассчитывается критическая продолжительность пожара (КПП).

Для того чтобы вычислить КПП, обратимся к формулам (4.52), (4.55), (4.59) и (4.60).

Подставляя в формулу (4.52) критическое значение средней температуры газовой среды в помещении, найдем критическую продолжительность пожара по условию достижения температурой в рабочей зоне предельно допустимого значения. Формула для расчета КПП по температуре имеет вид:

$$\tau_{\text{кр}}^T = \left[\frac{B}{A} \ln \left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} \right) \right]^n. \quad (4.62)$$

Подставляя в формулу (4.55) критическое значение средней парциальной плотности кислорода, найдем критическую продолжительность пожара по условию достижения концентрации кислорода в рабочей зоне своего предельно допустимого значения. Формула для расчета КПП по O_2 имеет вид:

$$\tau_{\text{кр}}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[\frac{BL_1\eta}{V} + \rho_{O_1} \right] \right\}^n. \quad (4.63)$$

Подставляя в формулу (4.59) критическое значение парциальной плотности токсичного газа, найдем КПП по условию достижения концентрацией токсичного газа в рабочей зоне своего предельно допустимого значения. Расчетная формула имеет вид:

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{т.г}} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{(1-\varphi)Q_n^p}{c_p \rho_0 T_0 L_2} \rho_{2\text{кр}}^2} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.64)$$

Наконец, подставляя в формулу (4.60) критическое значение средней оптической плотности дыма, получим формулу для расчета критической продолжительности пожара по потере видимости:

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{дым}} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\eta(1-\varphi)Q_n^p}{c_p \rho_0 T_0 D} \mu_{\text{кр}}} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.65)$$

Следует еще раз отметить, что формулы (4.62)-(4.65) можно применять лишь для помещений с небольшими открытыми проемами, если выполняется следующее условие [8]:

$$\Pi \leq 5,$$

где Π - критерий проемности, значение которого вычисляется по следующей формуле:

$$\Pi = \frac{F_{\text{пр}} \sqrt{H_{\text{пр}} g}}{V} \tau_{\text{кр}}^{\text{офп}},$$

где $F_{\text{пр}}$ - суммарная площадь открытых проемов; $H_{\text{пр}}$ - высота проемов; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $\tau_{\text{кр}}^{\text{офп}}$ - вычисляется по формулам (4.62)-(4.65); V - объем помещения.

В случае, когда $\Pi > 5$, необходимо учитывать поступление свежего воздуха в помещение. В этом случае для расчета КПП необходимо использовать формулы, полученные в работе [8].

4.3.2. Расчет критических значений средних параметров состояния среды в помещении

Выше было сказано, что между средними параметрами состояния среды в помещении и параметрами состояния газовой среды в месте пребывания людей существует взаимосвязь. Исследованию этой взаимосвязи был посвящен целый ряд работ (А.В. Матюшин, М.П. Башкирцев, Ю.С. Зотов и др.) В этих работах изучались поля (т.е. распределение по объему помещения) локальных параметров состояния. В результате большого числа натуральных экспериментов были установлены зависимости, позволяющие вычислять критические значения средних параметров состояния. Последовательно рассмотрим формулы для расчета критических значений средних параметров состояния, полученные на основании исследований разных авторов.

Формула для расчета критического значения средней температуры, которая следует из уравнения, приведенного в работе [2], имеет следующий вид:

$$T_{\text{доп}} = T_{\text{кр}} \left\{ \left[0,8 + 0,2 \left(\frac{y}{y_0} \right) \right] \left[1,33 - \left(\frac{x}{2x + x_0} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (4.66)$$

где $T_{\text{доп}} = (273 + 70)$ - предельно допустимая для людей температура в рабочей зоне, К; y_0 - половина высоты помещения, м; x_0 - половина расстояния от очага горения до места выхода из помещения, м; y - координата, отсчитываемая по вертикали от поверхности пола, м; x - координата, отсчитываемая по горизонтали от очага горения, м; $T_{\text{кр}}$ - критическое значение средней температуры в помещении, К. Координаты x и y в формуле (4.66) определяют положение рабочей зоны. Их значения являются заданными.

Формулы для расчета критического значения средней температуры и критического значения средней концентрации токсичного газа, которые следуют из уравнений, полученных в работе [12], имеют следующий вид:

$$T_{\text{кр}} = \frac{1 + a \exp\left(-\frac{\bar{y}}{2 - \bar{y}}\right)}{1 + ab} (T_{\text{доп}} - 273) + 273, \quad (4.67)$$

$$x_{\text{кр}} = x_{\text{доп}} \frac{1 + a \exp \left[-\frac{\bar{y}}{2 - \bar{y}} \right]}{1 + ab}, \quad (4.68)$$

где $T_{\text{доп}} = 343 \text{ К}$ – предельно допустимая температура в рабочей зоне; $x_{\text{доп}}$ – предельно допустимая концентрация токсичного газа, %; $y = \frac{y}{h}$; h – половина высоты помещения; a и b – коэффициенты, зависящие от удельной плотности тепловыделения и высоты помещения:

$$a = \frac{18,75}{2h} \ln(q + 1) \quad b = \frac{2h}{2,16q + 17,27},$$

где q – плотность тепловыделения, которая вычисляется по следующей формуле:

$$q = \frac{\eta Q_{\text{н}}^{\text{р}} M_{\tau}}{F_{\text{н}} \tau_{\text{кр}}}.$$

Формула Т.Г. Меркушкиной, Ю.С. Зотова, В.Н. Тимошенко для расчета критических значений всех средних параметров состояния газовой среды имеет следующий вид

$$\frac{\Phi_{\text{кр}} - \Phi_0}{\Phi_{\text{доп}} - \Phi_0} = \left[\frac{y}{2h} \exp \left(1,4 \frac{y}{2h} \right) \right]^{-1}, \quad (4.69)$$

где $\Phi_{\text{кр}}$ – критическое значение среднего параметра состояния; $\Phi_{\text{доп}}$ – предельно допустимое значение ОФП в рабочей зоне; Φ_0 – начальное значение ОФП; y – координата рабочей зоны, отсчитываемая от поверхности пола; h – половина высоты помещения.

Последняя формула (4.69) представлена в ГОСТ 12.1.004-91. Предельно допустимые значения ОФП были установлены в результате огромного числа медико-биологических и физических экспериментов. Конкретные их значения указывались во введении настоящего пособия.

4.3.3. Расчет коэффициента теплопоглощения (коэффициента теплопотерь) при определении критической продолжительности пожара

Как уже указывалось, коэффициент теплопотерь представляет собой отношение суммарного теплового потока в ограждения Q_w к скорости тепловыделения в очаге горения $Q_{\text{пож}}$, т.е.

$$\varphi_w = \frac{Q_w}{Q_{\text{пож}}}. \quad (4.70)$$

Скорость тепловыделения в каждый момент процесса развития пожара вычисляется по формуле

$$Q_{\text{пож}} = \eta \Psi_{\text{уд}} F_{\Gamma} Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \quad (4.71)$$

где F_{Γ} - площадь пожара, м^2 .

Суммарный тепловой поток в ограждения (выполненные из кирпича или из материалов, близких ему по своим теплофизическим свойствам) при значениях среднеобъемной температуры среды в помещении $T_0 < T_m \leq T_{\text{кр}}$ (где $T_0 \approx 290 \text{ К}$ и $T_{\text{кр}} \approx 343 \text{ К}$) можно рассчитать с помощью эмпирической формулы [2]:

$$Q_w^* = F_w q_0 \left[a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0)^2 \right]^3, \quad (4.72)$$

где q_0 , a , b_1 - размерные эмпирические константы ($q_0 = 4,07 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $a = 0,8 \text{ К}^{-1}$; $b_1 = 0,00065 \text{ К}^{-2}$); F_w - суммарная площадь поверхности ограждений, м^2 .

Для помещений, представляющих собой прямоугольный параллелепипед, суммарная площадь поверхностей ограждений вычисляется по формуле

$$F_w = 2[l_1 l_2 + 2h(l_1 + l_2)], \quad (4.73)$$

где l_1 , l_2 - ширина и длина помещения, м; h - половина высоты помещения, м. При этом предполагается, что площадь проемов пренебрежимо мала по сравнению с величиной F_w . Кроме того, при использовании этой формулы предполагается возможным не учитывать наличие предметов и оборудования, находящихся внутри помещения.

Следует сделать замечание по поводу формулы (4.72). При $T_m \rightarrow T_0$ (т.е. в первый момент процесса развития пожара при $t \rightarrow 0$) из этой формулы следует, что $Q_w^* \rightarrow 0$. Однако в первый момент времени поступление тепла в ограждения происходит главным образом за счет лучеиспускания от пламени. Поток лучистой энергии от пламени к ограждениям по мере задымления помещения постепенно уменьшается. При сильном задымлении излучение от пламени рассеивается в задымленной среде, заполняющей помещение. С учетом сказанного радиационный поток от очага горения к ограждениям при $F_{RAD} \ll F_w$ можно оценить по формуле [2]

$$Q_w^{RAD} = \varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4 \omega F_{RAD}, \quad (4.74)$$

где $C = 5,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - коэффициент излучения; ε - степень черноты пламени; F_{RAD} - площадь поверхности излучения, м^2 ; $T_{пл}$ - температура пламени, К ; ω - коэффициент, учитывающий ослабление радиационного потока из-за задымления.

Коэффициент ω в начальные моменты времени, когда среда еще достаточно прозрачна, равен единице. При сильном задымлении, которое может иметь место в конце начальной стадии пожара, этот коэффициент равен нулю. С учетом сказанного величину этого коэффициента можно приближенно оценить с помощью формулы

$$\omega = 1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0}. \quad (4.75)$$

Эта формула представляет собой линейную интерполяцию зависимости $\omega(T_m)$ в интервале температур $T_0 \leq T_m \leq T_{кр}$, т.е. в интервале времени, равном критической продолжительности пожара.

Из вышесказанного следует, что для расчета суммарного теплового потока в ограждения при начальной стадии пожара нужно использовать формулу

$$Q_w = Q_w^* + Q_w^{RAD} = F_w q_0 [a(T_m - T_0) - b(T_m - T_0)]^3 + C \varepsilon \left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4 \omega F_{RAD} \quad (4.76)$$

С учетом вышеизложенного значение коэффициента теплопотерь следует вычислять для каждого момента времени в начальной стадии пожара (т.е. при $0 < \tau < \tau_{кр}^T$) по формуле

$$\varphi_* = \frac{F_w q_0 [a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0)^2]^4}{\eta Q_H^p \psi_{уд} F_r} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right) \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0} \right) F_{RAD}}{\eta Q_H^p \psi_{уд} F_r}. \quad (4.77)$$

Из этой формулы следует, что величину φ_* лишь условно можно назвать коэффициентом, так как она является функцией $T_m(\tau)$ и изменяется во времени.

В интервале времени, равном критической продолжительности пожара, среднеобъемная температура среды в помещении не сильно отличается от "предельного" значения $T_{пред}$, приблизительно равного 345 К. Если температура среды перед пожаром $T_0 = 293$ К (что является типичным начальным условием), то в начальной стадии пожара выполняется условие

$$0 < \frac{b_1(T_m - T_0)^2}{a(T_m - T_0)} = \frac{b_1(T_m - T_0)}{a} \leq 0,04. \quad (4.78)$$

С учетом этой оценки правую часть уравнения (4.77) можно упростить, отбрасывая второй член первого слагаемого в квадратных скобках. После этой операции получим уравнение

$$\varphi_* = \frac{F_w q_0 [a(T_m - T_0)]^4}{\eta Q_H^p \psi_{уд} F_r} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right) \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0} \right) F_{RAD}}{\eta Q_H^p \psi_{уд} F_r}. \quad (4.79)$$

Среднее значение коэффициента теплопотерь φ в интервале температур $T_0 < T_m < T_{кр}$, т.е. в интервале времени, равном критической продолжительности пожара, определяется путем операции осреднения значения коэффициента φ_* , т.е.

$$\varphi = \frac{1}{(T_{кр} - T_0)} \int_{\Delta T_m=0}^{\Delta T_{кр}} \varphi_* d(\Delta T_m), \quad (4.80)$$

где $\Delta T_m = T_m - T_0$; $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_0$; ϕ - средний коэффициент теплопотерь.

Далее отдельно рассмотрим пожары в помещении при горении ТГМ и ГЖ. Вначале дается анализ пожаров в помещениях при горении ТГМ. При оценке радиационной составляющей теплового потока от пламени можно принять, что площадь поверхности излучения F_{RAD} равна площади пожара F_r , т.е. $F_{RAD} = F_r$.

Прежде всего, рассмотрим пожары при круговом распространении пламени по слою ТГМ. Для таких пожаров в помещении уравнение (4.79) преобразуется с помощью формулы (4.43):

$$\phi_* = \frac{F_w q_0 [a(T_m - T_0)]^4}{\eta Q_n^p \psi_{уд} \pi v_l^2 \tau^2} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100}\right)^4 \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0}\right)}{\eta Q_n^p \psi_{уд}} \quad (4.81)$$

Из формулы (4.52) следует, что

$$\tau^2 = \left[\frac{3c_p \rho_0 T_0 V}{(1 - \phi) \eta Q_n^p \psi_{уд} \pi v_l^2} \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right]^3, \quad (4.82)$$

где ϕ - среднее значение коэффициента теплопотерь.

При начальной стадии развития пожара выполняется условие

$$\frac{T_m - T_0}{T_0} \ll 1.$$

Из этого условия следует, что

$$\ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{T_m - T_0}{T_0} \right) \approx \frac{T_m - T_0}{T_0}. \quad (4.83)$$

С учетом формул (4.82) и (4.83) уравнение (4.81) преобразуется в следующую формулу:

$$\varphi_* = (1-\varphi)^{\frac{2}{3}} \frac{F_w q_0 (T_m - T_0)^{\frac{2}{3}} a^{\frac{4}{3}}}{(\eta Q_n^p \psi_{уд} v_{л}^2 \beta (3\rho_0 c_p V)^{\frac{2}{3}})} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100}\right)^4 \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0}\right)}{\eta Q_n^p \psi_{уд}}, \quad (4.84)$$

где φ_* - коэффициент теплопотерь при температуре среды $T_m(\tau)$; φ - средний коэффициент теплопотерь в интервале времени, равном критической продолжительности пожара.

Поставим полученное выражение для φ_* в формулу (4.80). После интегрирования получается уравнение для расчета среднего коэффициента теплопотерь, которое можно представить в виде

$$\varphi = (1-\varphi)^{\frac{2}{3}} \Gamma \Phi + \Delta_{RAD}, \quad (4.85)$$

где

$$\Gamma = \frac{\beta (T_{кр} - T_0)^{\frac{2}{3}}}{(\eta Q_n^p \psi_{уд} v_{л}^2 c_p^2 \rho_0^2)^{\frac{1}{3}}}; \quad \Phi = \frac{F_w}{V^{\frac{2}{3}}};$$

$$\beta = 0,6 \frac{q_0 a^{\frac{4}{3}}}{(9\pi)^{\frac{1}{3}}} = 0,595; \quad \Delta_{RAD} = \frac{1}{2} \varepsilon C \frac{\left(\frac{T_{пл}}{100}\right)^4}{\eta Q_n^p \psi_{уд}}.$$

Безразмерный комплекс Γ характеризует макрокинетику горения ТГМ. Безразмерный комплекс Φ есть обобщенная геометрическая характеристика помещения. Этот комплекс можно назвать критерием формы помещения. Если помещение имеет форму куба, то $\Phi = 6$. Для помещений, форма которых отличается от куба, $\Phi > 6$.

При вычислении суммарной площади поверхности ограждений F_w (и следовательно, критерия формы Φ) можно не учитывать наличие проемов, потому что здесь рассматриваются пожары в помещениях с относительно малыми проемами (т.е. помещения, у которых $\frac{F_{пр}}{F_w} \rightarrow 0$).

Безразмерный комплекс Δ_{RAD} является параметром влияния радиационного теплообмена и представляет собой отношение тепла,

теряемого из-за излучения единицей площади поверхности ТГМ, охваченной пламенем, к теплу, выделяющемуся на этой единичной площадке вследствие горения. Для большинства ТГМ значение параметра влияния радиационного теплообмена составляет малую величину. Например, если горючим материалом является древесина, у которой $T_{пл} \approx 10^3 \text{ К}$, $\psi_{уд} Q_n^p \approx 4 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, то параметр влияния радиационного теплообмена $\Delta_{RAD} \approx 0,06$.

Решение уравнения (4.85) можно получить численным методом. Этим методом были рассчитаны средние коэффициенты теплопотерь для пожаров в различных по форме и размерам помещениях при круговом распространении пламени по слою ТГМ. Результаты расчетов представлены на рис. 4.1.

Полученные результаты при условиях, когда $6 \leq \Phi \leq 24$ и $0,4 \leq \Gamma\Phi \leq 2$, с достаточной для практики точностью аппроксимируются формулой

$$\phi = 0,164 + 0,6\Gamma\Phi - 0,15(\Gamma\Phi)^2. \quad (4.86)$$

При линейном распространении пламени по поверхности ТГМ уравнение (4.79) преобразуется с помощью формулы (4.45) в следующее уравнение:

$$\phi_* = \frac{F_w g_0 [a(T_m - T_0)]^4}{\eta Q_n^p \psi_{уд} b_{г} \nu_{л} \tau} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100}\right)^4 \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0}\right)}{\eta Q_n^p \psi_{уд}}. \quad (4.87)$$

Из ранее полученной формулы (4.52) при $n=2$ следует

$$\tau = \left[\frac{B}{A_1} \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right]^2 = \left[\frac{c_p \rho_0 T_0 V}{(1-\phi) \eta Q_n^p b_{г} \psi_{уд} \nu_{л}} \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \right]^2, \quad (4.88)$$

где ϕ - среднее значение коэффициента теплопотерь.

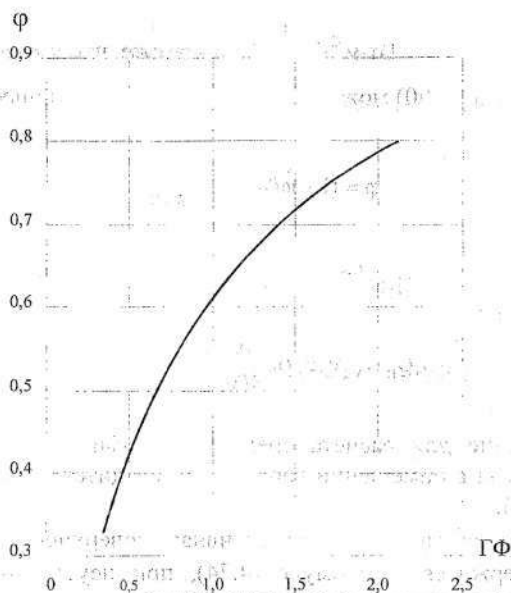


Рис. 4.1. Зависимость среднего коэффициента теплоперерь от параметра $\Gamma\Phi$ для пожаров при круговом распространении пламени по слою древесины

Уравнение (4.87) преобразуется с помощью формулы (4.88) и соотношения (4.83) в формулу

$$\varphi_* = \frac{(1-\varphi)^2 F_w q_0 (T_m - T_0)^5 a^4}{(\eta Q_n^p b_r \Psi_{уд} v_l)^2} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100}\right)^4 \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0}\right)}{\eta Q_n^p \Psi_{уд}} \quad (4.89)$$

Подставим полученное выражение для φ_* в формулу (4.80). После интегрирования получается уравнение для расчета среднего коэффициента теплоперерь в случае линейного распространения пламени

$$\varphi = (1-\varphi)^2 \frac{\beta_1 F_w (T_{кр} - T_0)^5}{(\eta Q_n^p b_r \Psi_{уд} v_l c_p \rho_0 V)^2} + \Delta_{RAD}, \quad (4.90)$$

где $\beta_1 = \frac{6}{11} a^3 q_0 = 1,65 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; Δ_{RAD} - то же, что и в формуле (4.85).

Уравнение (4.90) можно преобразовать в следующее:

$$\varphi = (1 - \varphi)^2 \Phi \Gamma_1 + \Delta_{RAD}, \quad (4.91)$$

$$\text{где } \Phi = \frac{F_w}{\frac{2}{3}}; \Gamma_1 = \frac{\beta_1 (T_{кр} - T_0)^6}{\left(\eta Q_{н}^p \Psi_{уд} v_{дл} c_p \rho_0 \frac{b_r}{\sqrt[3]{V}} \right)^2}.$$

Уравнение для расчета среднего коэффициента теплопотерь при условиях, когда в помещении горит ГЖ, выводится так же, как уравнения (4.85) и (4.91).

Следует сказать, что эффективная поверхность радиации F_{RAD} , которая содержится в формуле (4.74), при неустановившемся режиме выгорания ГЖ во времени изменяется. Чтобы учесть это, можно принять,

$$\text{что } F_{RAD} \approx F_r \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{ст}}}.$$

Формула для коэффициента теплопотерь φ_* при нестационарном горении жидкости с учетом ранее сделанной оценки (4.78) и зависимости (4.48) принимает следующий вид:

$$\varphi_* = \frac{F_w q_0 a^3 (T_m - T_0)^4}{\eta Q_{н}^p \Psi_{уд} F_r \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{ст}}}} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4}{\eta \Psi_{уд} Q_{н}^p} \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0} \right). \quad (4.92)$$

Преобразуем уравнение (4.92) с помощью зависимости (4.52). В результате получим выражение

$$\varphi_* = \frac{F_w q_0 a^{\frac{4}{3}} (T_m - T_0)^{\frac{4}{3}} \sqrt{\tau_{ст}}}{\eta Q_H^p \Psi_{уд} F_\Gamma} \left[\frac{2 \eta Q_H^p \Psi_{уд} F_\Gamma (1 - \varphi)}{3 c_p \rho_0 T_0 V \ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \sqrt{\tau_{ст}}} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4}{\eta Q_H^p \Psi_{уд}} \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0} \right) \quad (4.93)$$

После несложных преобразований уравнение (4.93) принимает следующий вид:

$$\varphi_* = \frac{F_w q_0 a^{\frac{4}{3}} \tau_{ст}^{\frac{1}{3}} (1 - \varphi)^{\frac{1}{3}} (T_m - T_0)^{\frac{1}{3}}}{\left(\eta Q_H^p \Psi_{уд} F_\Gamma \right)^{\frac{2}{3}} (1,5 c_p \rho_0 V)^{\frac{1}{3}}} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{T} \right)^4}{\eta Q_H^p \Psi_{уд}} \left(1 - \frac{T_m - T_0}{T_{кр} - T_0} \right) \quad (4.94)$$

Значение среднего коэффициента теплопотерь для интервала времени, равного критической продолжительности пожара, вычисляется путем подстановки уравнения (4.94) в уравнение (4.80). После интегрирования получается уравнение

$$\varphi = (1 - \varphi)^{\frac{1}{3}} \frac{q_0 F_w a^{\frac{4}{3}} \tau_{ст}^{\frac{1}{3}} (T_{кр} - T_0)^{\frac{1}{3}}}{2 \left(\eta Q_H^p \Psi_{уд} F_\Gamma \right)^{\frac{2}{3}} (1,5 c_p \rho_0 V)^{\frac{1}{3}}} + \Delta_{RAD}, \quad (4.95)$$

где

$$\Delta_{RAD} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4}{\eta Q_H^p \Psi_{уд}} \quad (4.96)$$

Введем следующие обозначения:

$$\Phi = \frac{F_w}{2 V^{\frac{1}{3}}}; \quad \Gamma_{ж} = \frac{q_0 a^{\frac{4}{3}} \tau_{ст}^{\frac{1}{3}} (T_{кр} - T_0)^{\frac{1}{3}}}{2 \left(\eta Q_H^p \Psi_{уд} F_\Gamma \right)^{\frac{2}{3}} (1,5 c_p \rho_0)^{\frac{1}{3}}}$$

С учетом введенных обозначений уравнение (4.95) принимает вид

$$\varphi = (1 - \varphi)^3 \Gamma_{\text{ж}} \Phi + \Delta_{RAD}. \quad (4.97)$$

В заключение анализа, посвященного среднему коэффициенту теплопотерь, рассмотрим гипотетический процесс выгорания ГЖ, когда $\tau_{\text{ст}} \rightarrow 0$. Формулы для расчета критической продолжительности пожара и среднего коэффициента теплопотерь существенно упрощаются, если сделать допущение, что процесс стабилизации горения жидкости происходит мгновенно. В этом случае уравнение, описывающее изменение средней температуры во времени, имеет следующий вид:

$$\ln \left(\frac{T_m}{T_0} \right) = \frac{\eta(1 - \varphi) Q_{\text{H}}^{\text{P}} F_{\Gamma} \Psi_{\text{уд}}}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau. \quad (4.98)$$

Уравнение для определения коэффициента теплопотерь φ , в этом случае имеет вид

$$\varphi_* = \frac{q_0 F_w a^3 (T_m - T_0)^3}{\eta Q_{\text{H}}^{\text{P}} \Psi_{\text{уд}} F_{\Gamma}} + \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{\text{пл}}}{100} \right)^4}{\eta Q_{\text{H}}^{\text{P}} \Psi_{\text{уд}}} \left[1 - \frac{T_m - T_0}{T_{\text{кр}} - T_0} \right]. \quad (4.99)$$

Формула для вычисления среднего коэффициента теплопотерь получается из уравнения (4.80) после подстановки в него выражения (4.99):

$$\varphi = \frac{3 q_0 F_w a^3 (T_{\text{кр}} - T_0)^3}{7 \eta Q_{\text{H}}^{\text{P}} \Psi_{\text{уд}} F_{\Gamma}} + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon C \left(\frac{T_{\text{пл}}}{100} \right)^4}{\eta Q_{\text{H}}^{\text{P}} \Psi_{\text{уд}}}. \quad (4.100)$$

Формула для расчета критической продолжительности по температуре в этом случае имеет вид

$$\tau_{\text{кр}}^T = \frac{c_p \rho_0 T_0 V}{\eta(1 - \varphi) Q_{\text{H}}^{\text{P}} F_{\Gamma} \Psi_{\text{уд}}} \ln \left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} \right), \quad (4.101)$$

где ϕ - средний коэффициент теплопотерь, который вычисляется по формуле (4.100).

Эта формула совпадает с рекомендуемой государственным стандартом формулой для расчета критической продолжительности пожара при горении ГЖ. Дополнением к рекомендации ГОСТ является полученная здесь формула (4.100) для определения коэффициента теплопотерь.

Из анализа следует, что формулу, рекомендуемую государственным стандартом, можно принять, строго говоря, лишь при условиях, когда $\tau_{кр}^T \gg \tau_{ст}$ (т.е. когда продолжительность начальной стадии пожара много больше времени стабилизации горения ГЖ).

Глава 5. ЗОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Зонные математические модели в основном используются для исследования динамики опасных факторов пожара в начальной стадии пожара. В начальной стадии распределение параметров состояния газовой среды по объему помещения характеризуется большой неоднородностью (неравномерностью). В этот период (отрезок) времени пространство внутри помещения можно условно поделить на ряд 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. В принципе, пространство внутри помещения можно разбить на любое число зон. В этой главе рассмотрим простейшую зонную модель пожара, которая применима при условиях, когда размеры очага горения значительно меньше размеров помещения.

Процесс развития пожара можно представить следующим образом. После воспламенения горючих веществ образующиеся газообразные продукты устремляются вверх, образуя 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 вышесказанным в объеме помещения можно выделить три характерные зоны: конвективную колонку над очагом пожара, припотолочный слой нагретого газа и воздушную зону с практически неизменными параметрами состояния, равными своим начальным значениям. Математическая модель пожара, базирующаяся на разбиении пространства на характерные области, получила название

трехзонной модели. Схема этой модели показана на рис. 5.1. На этой схеме использованы следующие обозначения: y_k - координата нижней границы припотолочного слоя, отсчитываемая от поверхности горения; $y_{дв}$ - высота дверного проема; d_3 - эквивалентный диаметр очага горения; $2h$ - высота помещения; G_k - поток газа, поступающего в припотолочный слой из конвективной колонки, кг·с⁻¹; $G_в$ - поток воздуха, поступающий в колонку из зоны III, кг·с⁻¹; G_r - поток вытесняемого газа из помещения, кг·с⁻¹; ψ - скорость выгорания, кг·с⁻¹; δ - расстояние от пола до поверхности горения, м.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением первой фазы начальной стадии пожара. Под понятием "первая фаза начальной стадии пожара" подразумевается отрезок времени, в течение которого нижняя граница припотолочного слоя, непрерывно опускаясь, достигает верхнего края дверного проема. При первой фазе начальной стадии пожара нагретые газы лишь накапливаются в припотолочной зоне.

При второй фазе нижняя граница II зоны расположена ниже верхнего края дверного проема. С наступлением второй фазы начинается процесс истечения нагретых газов из помещения через дверной проем. До наступления этой фазы имеет место лишь вытеснение (через дверной проем) холодного воздуха из III зоны.

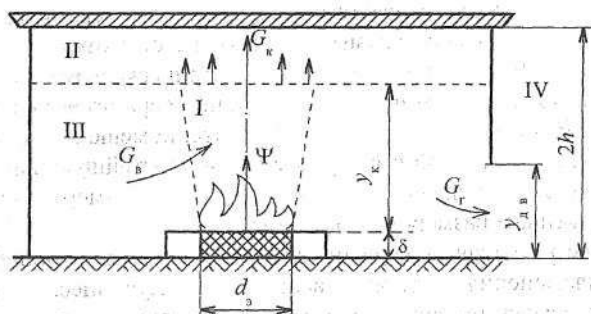


Рис. 5.1. Схема трехзонной модели пожара:

- I - зона конвективной струи (конвективная колонка);
- II - зона припотолочного нагретого газа; III - зона холодного воздуха; IV - зона наружного воздуха (наружная атмосфера)

Рассмотрим прежде всего I зону. Теория свободной конвективной струи к настоящему времени весьма детально разработана. Эта теория является одним из разделов вязкой аэродинамики газов. Она позволяет

рассчитывать поля температур, плотностей и скоростей в конвективной колонке. Для определения температур и массовых расходов в сечениях конвективной колонки можно использовать формулы [4]

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p G}, \quad (5.1)$$

$$G = 0,21 \left[\frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} (1-\chi) \right]^{\frac{1}{3}} (y + y_0)^{\frac{5}{3}}, \quad (5.2)$$

где $Q_{\text{пож}} = \eta \psi Q_n^p = \eta \psi_{\text{уд}} Q_n^p F_{\Gamma}$; $Q_{\text{пож}}$ - скорость тепловыделения, Вт; Q_n^p - теплота сгорания, Дж/кг; $\psi_{\text{уд}}$ - удельная скорость выгорания, кг/м²·с; g - ускорение свободного падения, м/с²; T_0 и ρ_0 - температура и плотность холодного (окружающего) воздуха; G - расход газов через сечение струи, отстоящее от поверхности горения на расстояние y , кг/с;

c_p - изобарная теплоемкость газа, Дж/кг·К; $\chi = \frac{Q_{w1}}{Q_{\text{пож}}}$ - доля, приходящаяся

на поступающую в ограждение теплоту от выделившейся в очаге горения; y - координата сечения колонки, отсчитываемая от поверхности горения, м; y_0 - расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения, м.

С помощью формул (5.1) и (5.2) можно рассчитать расход газа из I зоны, поступающего во II зону, и его температуру. Для этого нужно положить координату y в формулах (5.1) и (5.2) равной координате нижней границы припотолочного слоя y_k .

Расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения вычисляется по формуле [4]

$$y_0 = 1,5 \sqrt{F_{\Gamma}}, \quad (5.3)$$

где F_{Γ} - площадь пожара, м².

Рассмотрим теперь II зону (припотолочный слой нагретых газов). Объем этой зоны в момент времени τ равен

$$V_2 = F_{\text{пот}} (2h - y_k - \delta),$$

где $F_{\text{пот}}$ - площадь потолка; y_k - координата нижнего края припотолочного слоя газов. Масса газа, заключенная во II зоне, составляет величину $m_2 = \rho_2 V_2$. Давление в зоне II практически не меняется и остается равным начальному значению, т.е. p_0 . Внутренняя (тепловая) энергия II зоны составляет

$$U_2 = c_v \rho_2 T_2 V_2 = \frac{c_v}{R} p_0 V_2 = \frac{1}{k-1} p_0 V_2.$$

Запишем уравнения материального баланса и энергии для II зоны применительно к первой фазе начальной стадии пожара:

$$\frac{d(\rho_2 V_2)}{d\tau} = G_k, \quad (5.4)$$

$$\frac{d(c_v \rho_2 T_2 V_2)}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{w2} - p_0 \frac{dV_2}{d\tau}, \quad (5.5)$$

где ρ_2 - средняя плотность во II зоне; T_2 - средняя температура во II зоне; Q_{w2} - тепловой поток от припотолочного слоя газа в ограждения, кВт.

Параметры состояния T_2 и ρ_2 связаны между собой следующим уравнением:

$$p_0 T_0 = \rho_3 T_3 = \rho_1 T_1 = \rho_2 T_2. \quad (5.6)$$

Уравнение (5.6) следует из условия равенства давлений во всех зонах. Это условие является приближенным, но применимым для реальных пожаров.

Преобразуем уравнение энергии (5.5), используя уравнение (5.6),

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{c_v}{R} p_0 V_2 \right) + p_0 \frac{dV_2}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{w2}$$

или
$$p_0 \left(\frac{c_v}{R} + 1 \right) \frac{dV_2}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{w2}$$

и окончательно
$$c_p \rho_0 T_0 \frac{dV_2}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{w2}. \quad (5.7)$$

Из уравнения (5.1) следует

$$c_p T_k G_k = Q_{\text{пож}} - Q_{w1} + c_p T_0 G_k, \quad (5.8)$$

где $Q_{w1} = \chi Q_{\text{пож}}$.

Подставляя формулу (5.8) в уравнение (5.7), получим

$$c_p \rho_0 T_0 \frac{dV_2}{d\tau} = Q_{\text{пож}} - Q_{w1} - Q_{w2} + c_p T_0 G_k.$$

Примем, что $\frac{Q_{w1} + Q_{w2}}{Q_{\text{пож}}} = \varphi \approx \text{const}$ (для начальной стадии $\varphi \approx 0,55$).

После дальнейших преобразований получим следующее уравнение:

$$-F_{\text{пот}} \rho_0 \frac{dy_k}{d\tau} = \left[(1 - \varphi) \frac{Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} + G_k \right]. \quad (5.8a)$$

Подставим в это уравнение выражение для G_k (5.2):

$$\frac{dy_k}{d\tau} = \frac{(1 - \varphi)}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} Q_{\text{пож}} + \frac{0,21}{\rho_0 F_{\text{пот}}} \left[\frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} (y_k + y_0)^{\frac{5}{3}}. \quad (5.9)$$

Отметим, что в этом уравнении

$$Q_{\text{пож}} = \eta \Psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^{\text{P}} F_{\Gamma}.$$

Введем обозначения

$$\frac{(1 - \varphi) Q_{\text{пож}}}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} = \beta(\tau), \quad \frac{0,21}{F_{\text{пот}}} \left[\frac{g Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{\rho_0 c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} = \gamma(\tau).$$

Функции $\beta(\tau)$ и $\gamma(\tau)$ при горении твердых ГМ в момент времени $\tau = 0$ равны нулю, так как $F_{\Gamma} \rightarrow 0$.

Уравнение (5.9) принимает вид

$$\frac{dy_k}{d\tau} + \gamma(y_k + y_0)^3 + \beta = 0. \quad (5.10)$$

Начальное условие $y_k(\tau=0) = 2h - \delta$.

Решение уравнения (5.10) при заданном начальном условии будем искать для интервала времени от $\tau = 0$ до τ_* , где τ_* - момент окончания первой фазы начальной стадии пожара. После того как найдена функция $y_k(\tau)$, находим $G_k = f_1(\tau)$; $V_2 = f_2(\tau)$.

Обратимся к уравнению материального баланса (5.4). Интегрируя его, получаем

$$\rho_2 V_2 = \int_0^{\tau} G_k d\tau. \quad (5.11)$$

После преобразований из формулы (5.11) получаем

$$\rho_2 = \frac{1}{F_{\text{пот}} [2h - y_k(\tau) - \delta]} \int_0^{\tau} G_k(\tau) d\tau. \quad (5.12)$$

После вычислений плотности ρ_2 определяется средняя температура в припотолочном слое газа

$$T_2 = T_0 \frac{\rho_0}{\rho_2}. \quad (5.13)$$

Уравнение материального баланса для токсичного газа (продукт горения) во II зоне имеет вид

$$\frac{d(\rho_n V_2)}{d\tau} = \psi L, \quad (5.14)$$

где ρ_n - парциальная плотность токсичного газа; L - количество (масса) токсичного газа, образующаяся при сгорании 1 кг горючего материала.

Из формулы (5.14) следует формула

$$\rho_n = \frac{1}{V_2} \int_0^{\tau} \psi(\tau) \cdot L d\tau = \frac{L}{V_2} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{LM_{\tau}}{V_2}, \quad (5.15)$$

где M_τ - количество (масса) ГМ, выгоревшего к моменту времени τ .

Уравнение дыма имеет вид

$$\frac{d(\mu_2 V_2)}{d\tau} = D\Psi, \quad (5.16)$$

и, следовательно,

$$\mu_2 = \frac{1}{V_2} \int_0^\tau D\Psi d\tau = \frac{DM_\tau}{V_2}. \quad (5.17)$$

Рассмотрим частный случай, когда

$$Q_{\text{пож}} = \eta\Psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^p F_\Gamma = \text{const}; \quad F_\Gamma = \text{const}; \quad \delta = 0.$$

В этом случае будем иметь $G_k = B(y_k + y_0)^{\frac{5}{3}}$,

где $B = 0,21 \left[\frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{c_p T_0} \right] = \text{const}.$

Далее следует отметить, что $y_0 = \text{const}$;

$$\frac{(1-\varphi)Q_{\text{пож}}}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} = C_1 = \text{const}; \quad \frac{0,21 \left[\frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}}}{\rho_0 F_{\text{пот}}} = C_2 = \text{const}.$$

Следовательно, имеем уравнение с разделяющимися переменными

$$-\frac{dy_k}{d\tau} = C_1 + C_2 (y_k + y_0)^{\frac{5}{3}}.$$

С помощью этого уравнения рассчитывается изменение координаты границы припотолочного слоя в течение времени.

Глава 6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ (ПОЛЕВЫЕ) МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Наиболее детальный уровень моделирования могут обеспечить, в принципе, полевые модели пожара. Эти модели называют дифференциальными. Полевые модели базируются на использовании дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей. Эти уравнения включают реологический закон Стокса, закон теплопроводности Фурье, законы диффузии, законы радиационного переноса и т.п. Система уравнений, описывающих изменения во времени указанных параметров газовой среды в каждой точке пространства внутри помещения чрезвычайно громоздка. Решение названной системы осуществляется с помощью мощных ЭВМ. Результаты решения получаются в форме полей скоростей, температур, концентраций продуктов горения и кислорода в любой момент времени протекания пожара.

Реализация полевых моделей ограничена возможностями современной вычислительной техники, а главное – уровнем современных знаний о таких, например, явлениях, как турбулентность и радиационно-конвективный теплоперенос в поглощающей и рассеивающей среде, каковой является задымленный газ в помещении при пожаре. По этой причине разработанные к настоящему времени полевые модели носят ограниченный характер.

В настоящем пособии рассматриваются две простейшие полевые модели. В первой модели принимается самая простая гипотеза относительно турбулентных процессов переноса в газовой среде, заполняющей помещение, и считается возможным ограничиться рассмотрением переноса энергии в газовой среде только путем конвекции и теплопроводности. (Эта модель была разработана в 1987 г. И.Ф. Астаховой.) Кроме того, газовая среда в помещении рассматривается как вязкая теплопроводная несжимаемая жидкость в приближении Буссинеска (сжимаемость учитывается в члене с архимедовой силой). Уравнение энергии в силу вышесказанного не содержит член, описывающий радиационный перенос энергии. Предполагается, что поля всех параметров являются двумерными (а не трехмерными, как это имеет место в большинстве реальных случаев), т.е. пространственная постановка задачи заменяется плоской; коэффициенты турбулентного переноса (турбулентная вязкость и теплопроводность) принимаются постоянными

величинами для всех точек пространства внутри помещения; расчет температурных полей в ограждающих конструкциях основан на использовании дифференциального уравнения Фурье-Кирхгофа, записанного в линейном приближении. В качестве связи задач о поле температур в газовой среде и в ограждениях использовались эмпирические формулы, описывающие зависимость коэффициентов теплоотдачи на поверхностях ограждений от температур газовой среды и поверхности ограждений.

Эта модель представлена следующими уравнениями для газовой среды в помещении:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{\text{RePr}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial \Theta}{\partial x} - v \frac{\partial \Theta}{\partial y} + Q_1, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \Theta, \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (6.4)$$

где $\text{Gr} = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu^2}$ - число Грасгофа; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ - число Прандтля; $\text{Re} = \frac{v_1 L}{\nu}$ -

число Рейнольдса; $u = \frac{w_x}{v_1}$, $v = \frac{w_y}{v_1}$ - безразмерные составляющие

скоростей $x = \frac{\bar{x}}{L}$, $y = \frac{\bar{y}}{L}$ - безразмерные координаты; $t = \frac{\bar{t} L}{v_1}$ - безразмерное

время; $v_1 = \sqrt{gH}$ - характерная скорость; g - ускорение свободного падения; H - высота помещения; L - размер помещения вдоль оси x ; ν - коэффициент эффективной (турбулентной) вязкости; a - эффективная

температуропроводность; $p' = \frac{P}{\Delta p}$ - безразмерное давление; Δp - перепад

давлёний; Q_1 - мощность источника горения в безразмерном виде; Θ - безразмерный перепад температур.

В качестве значений Θ на ограждающих конструкциях берется решение следующей задачи о нагревании ограждения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right), \quad (6.5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = \alpha_1 (T - T_n) \quad \text{при } Z = 0, \quad (6.6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = \left(\alpha + \frac{q}{\Theta_p - T} \right) (\Theta_p - T) \quad \text{при } Z = b, \quad (6.7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_1 (T - T_n) \quad \text{при } y = 0, H, \quad (6.8)$$

$$T = T_0 \quad \text{при } t = 0, \quad (6.9)$$

где T - температура ограждения; b - толщина ограждающей конструкции; a_1 - коэффициент температуропроводности материала ограждения; Θ_p - температура набегающего газа; α - коэффициент теплообмена на необогреваемой поверхности конструкции; λ - коэффициент теплопроводности материала ограждающей конструкции; α_1 - коэффициент теплоотдачи на обогреваемой поверхности конструкции, который вычисляется по эмпирическим формулам; q - эффективное падающее излучение; T_n - температура воздуха с необогреваемой стороны.

В этой модели не рассматривается задымление и состав среды в помещении. Поэтому математическая модель не содержит уравнений диффузии. Для численного решения с помощью ЭВМ математической модели предлагается использовать один из методов дробных шагов - метод Писмена-Рекфорда.

Характеризуя в целом эту полевую модель, необходимо сделать ряд замечаний. Прежде всего, следует отметить, что уравнения энергии (6.1) и движения (6.2), (6.3) нужно рассматривать как результат усреднения по методу Рейнольдса актуальных уравнений и поэтому коэффициенты переноса (вязкость и теплопроводность) в этих уравнениях зависят от характера гидродинамических и термодинамических процессов в движущейся среде. Значения этих коэффициентов могут существенно различаться в разных точках помещения. Проблема вычисления этих

коэффициентов есть центральная проблема турбулентности в гидродинамике.

В модели И.Ф. Астаховой принимается, что значения коэффициентов турбулентной вязкости и теплопроводности есть постоянные величины, не зависящие ни от координат, ни от времени. При этом следует сказать, что заранее не известно, какие конкретные числовые значения этих коэффициентов нужно брать. Из общих соображений и качественных оценок известно, что турбулентные коэффициенты переноса в тысячи и десятки тысяч раз больше своих "ламинарных" (молекулярных) аналогов. Подобрать "приемлемые" значения этих коэффициентов можно лишь путем сравнения данных расчета с данными физического эксперимента. Есть основания предполагать, что числовые значения этих коэффициентов, помимо всего прочего, могут зависеть от геометрических размеров пожара (масштабный фактор). Это обстоятельство и двумерность рассмотренной полевой модели ограничивают сферу ее практического использования.

Вторая модель, которую мы рассмотрим, базируется на следующих допущениях: газовая среда в помещении так же, как в первой модели, рассматривается как несжимаемая жидкость в приближении Буссинеска, эффекты излучения в работе также не рассматриваются. В первом варианте модели предполагается, что температура ограждающих поверхностей есть постоянная величина ("изотермические" граничные условия), а во втором варианте предполагается равенство нулю градиентов температур в газовой среде около поверхности ограждений ("адиабатные" граничные условия). В отличие от первой модели проблема турбулентности решалась путем использования гипотезы о вихревой вязкости. При моделировании горения используется допущение о существовании локального термодинамического и химического равновесия (диффузионная модель горения).

Система уравнений, моделирующая пожар, представлена в переменных "функция тока" – "вихрь" $(\tilde{\psi}, \tilde{\omega})$. Она включает уравнения сохранения завихренности $\tilde{\omega}$, уравнение для определения функции тока $\tilde{\psi}$, уравнения сохранения энергии потока ϕ_0 и концентрации нейтрального компонента \tilde{Z} :

$$\frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{U} \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{V} \tilde{\omega}}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{v}_{\tau,x} \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{v}_{\tau,y} \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{y}} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\nu}{\nu_0} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\omega}}{\partial \tilde{y}^2} \right) \frac{1}{\text{Re}} - \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{x}} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\psi}}{\partial \tilde{y}^2} = -\tilde{\omega}. \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial \tilde{\Phi}_0}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{U} \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{V} \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{\text{RePr}} \left[\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{a}_{\tau,x} \frac{\partial \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{a}_{\tau,y} \frac{\partial \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{y}} \right) \right] + \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\rho_0}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{\rho} \tilde{a} \frac{\partial \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{\rho} \tilde{a} \frac{\partial \tilde{\Phi}_0}{\partial \tilde{y}} \right) \right]. \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{U} \tilde{Z}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{V} \tilde{Z}}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left[\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{D}_{\tau,x} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{D}_{\tau,y} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{y}} \right) \right] + \frac{\rho_0}{\rho} \frac{1}{\text{ReSc}} \left[\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{\rho} \tilde{D} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{\rho} \tilde{D} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{y}} \right) \right]. \quad (6.13)$$

$$\tilde{\omega} = -\frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{x}}, \quad \tilde{U} = \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{y}}, \quad \tilde{V} = \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}}$$

$$\tilde{v}_{\tau,x} = \text{Re} \gamma \tilde{l}^3 \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}}, \quad \tilde{v}_{\tau,y} = \text{Re} \gamma \tilde{l}^3 \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{y}}$$

$$\tilde{l} = 0,4\tilde{n}, \quad \tilde{n} = \frac{n}{H}, \quad \tilde{l}_{\max} = 0,07$$

$$\tilde{a}_{\tau,x} = \frac{\tilde{v}_{\tau,x}}{\text{Pr}_{\tau}},$$

$$D_{\tau,x} = \frac{\tilde{v}_{\tau,x}}{\text{Sc}_{\tau}}$$

$$\tilde{x} = \frac{x}{H}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{H}, \quad \tilde{U} = \frac{U}{V_1}, \quad \tilde{V} = \frac{V}{V_1}, \quad \tau = \frac{tV_1}{H},$$

где ω - завихренность, с^{-1} ; ψ - функция тока, $\text{м}^2/\text{с}$; $\tilde{\Phi}_0 = \frac{\Phi_0 - h_s}{h_s - h_2}$ -

безразмерная энергия потока; $\Theta = \frac{h - h_2}{h_s - h_2}$ - безразмерная энтальпия; h_s, h_2 -

- значения энтальпии в пламени и в потоке воздуха; $\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}, \text{Sc}, \text{Pr}_{\tau}, \text{Sc}_{\tau}$ - соответственно числа Рейнольдса и Грасгофа, а также числа Прандтля и

Шмидта для ламинарного и турбулентного режимов течения; l, l_{\max} - текущая и максимальная длина пути смещения, м; n - нормаль к ограждающим поверхностям помещения м; H - высота помещения, м; $V_1 = \sqrt{gH}$ - масштаб скорости, м/с; ρ_0 - плотность окружающей среды, кг/м³; $v_{t,x}, a_{t,x}, v_{t,y}, a_{t,y}$ - коэффициенты турбулентного обмена вдоль осей x, y , м²/с.

Для численной реализации нестационарные уравнения завихренности, энергии и концентрации компонента Z записывались в общем виде в консервативной форме. В целях более точной аппроксимации основных уравнений и учета приграничных эффектов для решений этих уравнений применялась консервативная конечно-разностная схема второго порядка точности по пространственной переменной и первого порядка по временной переменной. Решение нестационарных уравнений производилось по явной двухслойной схеме на пятиточечном шаблоне типа "крест". Для конвективных членов на n -м временном слое использована односторонняя аппроксимация, учитывающая направление потока в ячейке. Уравнение Пуассона для функции тока решалось методом итерации с применением верхней релаксации. Для аппроксимации граничных условий использованы конечно-разностные соотношения первого и второго порядка точности. При решении конечно-разностных уравнений созданы алгоритм и программа для реализации модели пожара в помещении с помощью ЭВМ ЕС-1033.

В связи с тем, что теория процессов переноса в движущейся среде при пожаре в помещении в настоящее время разработана еще не полностью, нельзя ожидать достоверных количественных результатов при использовании дифференциальных моделей пожара. Тем не менее эти модели позволяют получать хорошие в качественном отношении представления о картине вихревого движения газа и о распределении температур в среде при пожаре в помещении.

Заключение

В настоящем учебном пособии наиболее подробно рассмотрены различные аспекты метода прогнозирования ОФП на основе интегральной математической модели пожара в помещении. Вместе с тем из-за ограниченного объема книги в нее не был включен ряд теоретических разработок, относящихся к этой математической модели пожара. К таким разработкам относятся: теория газообмена второго приближения, позволяющая учесть влияние неоднородности температурного поля на расходы газа и воздуха через проемы; методы расчета расходов газа и воздуха через круглые проемы; методы вычисления коэффициентов n_1 , n_2 , n_3 и m , которые содержатся в балансовых уравнениях и учитывают неоднородность температурных и концентрационных полей в помещении; методы расчета скорости выгорания с учетом влияния процессов образования золы и температуры газовой среды в помещении и др. Сведения по этим вопросам даны в публикациях [3, 4, 7, 8].

Сущность методов прогнозирования ОФП на основе зонных математических моделей пожара в помещении поясняется на примере одной из простейших моделей. В этой модели используются приближенные зависимости для описания конвективной колонки над очагом горения, заимствованные из книги [4]. Более детальные сведения по этому вопросу представлены в недавно опубликованных книгах [10, 13].

Методы прогнозирования ОФП на основе дифференциальных моделей пожара находятся сейчас в стадии развития и совершенствования. Материалы по этим моделям, включенные в данное учебное пособие, дают лишь общее представление об особенностях дифференциальных моделей и путях их численной реализации. Следует отметить, что к настоящему времени создана новая дифференциальная трехмерная математическая модель пожара PHOENICS (Parabolic Hiperbolicor Elliptic Numerical integ. Code Serie). Эта модель разработана корпорацией CHAM Ltd, которая основана и возглавляется проф. Д. Б. Сполдингом. Аналог такой модели и ее компьютерная реализация разработаны в последнее время сотрудниками МЭИ (Технический университет) и ИВТ РАН (Институт высоких температур Академии наук России). Эта модель называется ANES (Automatic Numerical Experiments Sistem).

В ближайшее время эти разработки найдут широкое применение в инженерной практике при решении вопросов пожарной безопасности.

Литература

1. Кошмаров Ю.А. Развитие пожара в помещении. Горение и проблемы тушения пожаров. - Сб. науч. тр. Вып. 5. ВНИИПО МВД СССР. - М., 1955. С. 31-45.
2. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. - 444 с.
3. Термогазодинамика пожаров в помещении. Под ред. Ю.А. Кошмарова. - М.: Стройиздат, 1988. - 448 с.
4. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. Пер. с англ. - М.: Стройиздат, 1990. - 421 с.
5. Кошмаров Ю.А., Зотов Ю.С., Андреев В.В., Пузач С.В. Прогнозирование ОФП / Лабораторный практикум. М.: МИПБ МВД России, 1997. - 82 с.
6. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. М., 1992.
7. Кошмаров Ю.А. Газообмен помещения при пожаре / Сб. трудов «Пожарная профилактика». Сб. науч. тр. Вып. 15. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1979. С. 3-29.
8. Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В. Процессы нарастания ОФП в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара. М.: МИПБ МВД России, 1998. - 90 с.
9. Алексашенко А.А., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Тепломассоперенос при пожаре. - М.: Стройиздат, 1982. - 173 с.
10. Gox G. Compartment fire modeling. Combustion Fundamentals offire. ISBN0-12-194230. Academic Press, 1995. 520 p.
11. Системный анализ проблемы пожарной безопасности народного хозяйства. Под ред. Н.Н. Брушлинского. М.: Стройиздат, 1988. - С. 413.
12. Матюшин А.В. Основы обеспечения пожарной безопасности зданий ручными и автоматическими средствами противопожарной защиты. Дис... д-ра техн. наук. ВИПТШ МВД РФ, 1995. - 310 с.
13. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакив Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. Пер. с англ. М., Мир, 1991. 678 с.
14. Астахова И. Ф. Математическое моделирование при оценке огнестойкости строительных конструкций, работающих в условиях пожара в помещении // Известия Сибирского отделения АН СССР, № 15, вып. 4. Новосибирск: Наука, 1987.

База данных типовой горючей нагрузки (ГН)

1. Здания I-II ст. огнест.; мебель+бытовые изделия	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0108
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	270,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,0300
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,20300
угарного (CO), кг/кг.....	0,00220
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01400

2. Здание I-II ст. огнест.; мебель+ткани	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0108
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	82,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,4370
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,28500
угарного (CO), кг/кг.....	0,00220
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00600

3. Здание III-IV ст. огнест.; мебель+бытовые изделия	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0465
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,03440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	270,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,0300
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,20300
угарного (CO), кг/кг.....	0,00220
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01400

4. Здание III-IV ст. огнест.; мебель+ткани

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0465
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,03440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	82,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,4370
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,28500
угарного (CO), кг/кг.....	0,00220
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00600

5. Здание I ст. огнест.; мебель+ткани (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0125
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01620
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	58,50
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,4370
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,32000
угарного (CO), кг/кг.....	0,01930
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

6. Здание III ст. огнест.; мебель+ткани (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,04
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01620
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	58,50
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,4370
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,32000
угарного (CO), кг/кг.....	0,01930
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

7. Кабинет; мебель+бумага (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14002,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,042
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01290
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	53,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1610
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,64200
угарного (CO), кг/кг.....	0,03170
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

8. Помещение, облицованное панелями; панели ДВП

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	18100,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0405
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01430
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	130,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,68600
угарного (CO), кг/кг.....	0,02150
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

9. Админ. помещение; мебель+бумага (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14002,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,022
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02100
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	53,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1610
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,43400
угарного (CO), кг/кг.....	0,04300
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

10. Лекарств. препарат; этил. спирт+глицерин (0,95+0,05)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	26600,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	812,8
Удельная скорость выгорания, кг/м ² .с.....	0,03300
Дымообразующая способность, Нп-м ² /кг.....	88,10
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,3040
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,91200
угарного (CO), кг/кг.....	0,26200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

11. Обществ. здания; мебель+линолеум ПВХ (0,9+0,1)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,015
Удельная скорость выгорания, кг/м ² .с.....	0,01370
Дымообразующая способность, Нп-м ² /кг.....	47,70
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,3690
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,47800
угарного (CO), кг/кг.....	0,03000
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00580

12. Библиотеки, архивы; книги, журналы на стеллажах

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14500,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0103
Удельная скорость выгорания, кг/м ² .с.....	0,01100
Дымообразующая способность, Нп-м ² /кг.....	49,50
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1540
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,10870
угарного (CO), кг/кг.....	0,09740
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

13. Сценическая часть зрительного зала; древесина

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0368
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

14. Верхняя одежда; ворс. ткани (шерсть+нейлон)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	23300,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0835
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01300
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	129,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,6980
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,46700
угарного (CO), кг/кг.....	0,01450
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

15. Резинотехн. изделия; резина, изделия из нее

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	36000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0184
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01120
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	850,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,9900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,41600
угарного (CO), кг/кг.....	0,01500
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

16. Окрашенные полы, стены; дерево+краска РХО(0,9+0,1)	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14100,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0151
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	71,30
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,2180
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,47000
угарного (CO), кг/кг.....	0,03490
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00100

17. Выст. зал, мастерская; дерево+ткани+краски (0,9+0,09+0,01)	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0163
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01520
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	53,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,2180
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,42300
угарного (CO), кг/кг.....	0,02300
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00010

18. Издательства, типографии	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,004
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00610
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	41,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1580
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,77100
угарного (CO), кг/кг.....	0,16900
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

19. Каюта с синтет. отделкой; дерево+ткани+отделка

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0177
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01500
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	133,50
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,2490
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,84500
угарного (CO), кг/кг.....	0,04250
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,02300

20. Мебель; дерево+облицовка (0,9+0,1)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0154
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01350
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	84,10
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,2880
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,55000
угарного (CO), кг/кг.....	0,03670
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00360

21. Промтовары; текстильные изделия

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0071
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	60,60
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,5600
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,87900
угарного (CO), кг/кг.....	0,06260
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

22. Кабельный подвал/поток; кабели АВВГ+АПВГ

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	30700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0071
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	521,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,1900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,65000
угарного (CO), кг/кг.....	0,12950
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,02020

23. Химическое вещество; толуол

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	40900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	860
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,04300
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	562,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,0980
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	3,67700
угарного (CO), кг/кг.....	0,14800
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

24. Химическое вещество; ксилол

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	41200,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	860
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,09000
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	402,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,6230
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	3,65700
угарного (CO), кг/кг.....	0,14800
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

25. Бензин А-76

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	43200,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	745
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,05850
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	256,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,4050
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	2,92000
угарного (CO), кг/кг.....	0,17500
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

26. Керосин

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	43300,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	794
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,04150
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	438,10
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,3410
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	2,92000
угарного (CO), кг/кг.....	0,14800
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

27. Дизельное топливо; соляр

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	45400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	853
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,04250
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	620,10
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,3680
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	3,16300
угарного (CO), кг/кг.....	0,12200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

28. Радиоматериалы; поли(этилен, стирол, пропилен), гетинакс

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	34800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0137
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01770
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	381,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,3120
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,76400
угарного (CO), кг/кг.....	0,10000
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00730

29. Электротехн. материалы; текстолит, карболит

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	20900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0125
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00760
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	327,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,9500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,37500
угарного (CO), кг/кг.....	0,05560
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00540

30. Теплоноситель; турбинное масло ТП-22

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	41900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	883
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,03000
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	243,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-0,2820
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,70000
угарного (CO), кг/кг.....	0,12200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

31. Электрокабель АВВГ; ПВХ-оболочка+изоляция

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	25000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0071
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	635,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,1900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,39800
угарного (CO), кг/кг.....	0,10900
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,02450

32. Электрокабель АПВГ; ПВХ-оболочка+полиэтилен

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	36400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0071
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02440
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	407,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,1900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,90300
угарного (CO), кг/кг.....	0,15000
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01600

33. Телефонный кабель ТПВ; ПВХ+полиэтилен

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	34600,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0022
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00850
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	556,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,1900
Выделение газа:	
углекислого газа (CO ₂), кг/кг.....	0,90300
угарного (CO), кг/кг.....	0,12400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01560

34. Сырье для нефтехимии; нефть

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	44200,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	885
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02410
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	438,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	3,2400
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	3,10400
угарного (CO), кг/кг.....	0,16100
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

35. Химическое вещество: ацетон

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	29000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	790
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,04400
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	80,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,2200
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	2,29300
угарного (CO), кг/кг.....	0,26900
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

36. Химическое вещество; этиловый спирт

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	27500,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	789,3
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,03100
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	80,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,3620
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,93700
угарного (CO), кг/кг.....	0,26900
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

37. Лесопильный цех I-III ст.огнест.; древесина

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0396
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

38. Лесопильный цех IV-V ст.огнест.; древесина

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0583
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

39. Цех деревообработки; древесина

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,022
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

40. Цех сушки древесины; древесина	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0375
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

41. Производство фанеры; древесина+фанера (0,5+0,5)	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16100,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0191
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01170
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	80,50
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1770
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,05500
угарного (CO), кг/кг.....	0,07200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

42. Штабель древесины; хвойный+лиственный лес	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0585
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	57,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

43. Хвойные древесные стройматериалы; штабель

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0585
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00630
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	61,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

44. Лиственные древесные стройматериалы; штабель

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0585
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01400
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	53,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,02400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

45. Клееные стройматериалы; фанера

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	18400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0167
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00890
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	104,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,2050
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,54000
угарного (CO), кг/кг.....	0,12100
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

46. Сырье для легкой промышл.; хлопок разрыхл.

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0445
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02130
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	0,60
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,3000
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,57000
угарного (CO), кг/кг.....	0,00520
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

47. Сырье для легкой промышл.; лен разрыхл.

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,05
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02130
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	3,37
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,8300
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,36000
угарного (CO), кг/кг.....	0,00390
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

48. Сырье для легкой промышл.; хлопок+капрон (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,028
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01250
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	4,30
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-3,5500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,04500
угарного (CO), кг/кг.....	0,01200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

49. Сырье для легкой промышл.; шерсть	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	21800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,028
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02000
Дымообразующая способность, Нл·м ² /кг.....	164,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,7590
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,71500
угарного (CO), кг/кг.....	0,01530
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

50. Пищ. промышл.; пшеница, рис, гречиха и мука из них	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	17000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,005
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00800
Дымообразующая способность, Нл·м ² /кг.....	1096,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-0,9680
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,81200
угарного (CO), кг/кг.....	0,16300
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

51. Сырье и изделия из синтетического каучука	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	43000,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0143
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01100
Дымообразующая способность, Нл·м ² /кг.....	212,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,9850
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,40800
угарного (CO), кг/кг.....	0,15000
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00500

52. Склад льноволокна

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,071
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02130
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	3,40
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,8300
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,36000
угарного (CO), кг/кг.....	0,00390
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

53. Склад хлопка в тюках

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0042
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01670
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	0,60
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,57800
угарного (CO), кг/кг.....	0,00520
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

54. Склад бумаги в рулонах

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15100,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,005
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00800
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	41,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1580
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,66350
угарного (CO), кг/кг.....	0,10770
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

55. Провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	37800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,005
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,19170
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	850,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,9900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,41600
угарного (CO), кг/кг.....	0,01500
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

56. Склад оргстекла (ПММА)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	26400,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,008
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,00410
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	78,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,0900
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,79500
угарного (CO), кг/кг.....	0,12660
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

57. Кабели+провода; 0,75*(АВВГ, АПВГ, ТПВ)+0,25*(КПРТ, ПР, ШРПС)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	33500,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0054
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,06220
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	612,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,3890
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,65500
угарного (CO), кг/кг.....	0,09950
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01400

58. Дерево+лак.покрытие; 0,95*древесина+0,05*(ФЛ+РХО)	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13900,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0151
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02250
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	64,10
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,1910
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,72400
угарного (CO), кг/кг.....	0,02050
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00050

59. Автомобиль; 0,3*(резина, бензин)+0,15*(ППУ, искожа ПВХ)+0,1* эмаль	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	31700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0068
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02330
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	487,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-2,6400
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,29500
угарного (CO), кг/кг.....	0,09700
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01090

60. Зал; 0,5*ДВП+01*(ткань, искожа ПВХ, ППУ)+0,2*дерево с покрытием	
Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16200,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0293
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01230
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	175,60
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,5740
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,81700
угарного (CO), кг/кг.....	0,04100
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,01430

61. Тара: древесина+картон+полистирол (0,5+0,25+0,25)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	20710,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,01
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01800
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	155,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,5200
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,97000
угарного (CO), кг/кг.....	0,09400
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00460

62. Упаковка: бумага+картон+поли(этилен+стирол) (0,4+0,3+0,15+0,15)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	23540,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,004
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01320
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	172,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,7000
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,67900
угарного (CO), кг/кг.....	0,11200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00370

63. Индустриальное масло

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	42700,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	920
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,04300
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	480,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,5890
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,07000
угарного (CO), кг/кг.....	0,12200
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

64. Вешала текстильных изделий

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	16720,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,0078
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,02450
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	61,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	2,5600
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,87900
угарного (CO), кг/кг.....	0,06300
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

65. Отделка: ковролин

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	15397,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,021
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01300
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	150,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	2,5500
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	1,22500
угарного (CO), кг/кг.....	0,20700
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00390

66. Мебель+бумага (0,8) + ковровое покрытие (0,2)

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	14280,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,034
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01290
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	72,40
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	1,4390
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,75900
угарного (CO), кг/кг.....	0,06800
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00080

67. Занавес зрительного зала кинотеатра

Низшая теплота сгорания, кДж/кг.....	13800,0
Линейная скорость пламени, м/с / Плотность ГЖ, кг/м ³	0,05
Удельная скорость выгорания, кг/м ² ·с.....	0,01150
Дымообразующая способность, Нп·м ² /кг.....	50,00
Потребление кислорода (O ₂), кг/кг.....	-1,0300
Выделение газа:	
углекислого (CO ₂), кг/кг.....	0,20300
угарного (CO), кг/кг.....	0,00220
хлористого водорода (HCl), кг/кг.....	0,00000

Кошмаров Юрий Антонович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА
В ПОМЕЩЕНИИ

Учебное пособие

Редактор *Е. В. Папкина*
Технический редактор *И. Ю. Муравская*
Корректор *Н. В. Федькова*
Компьютерный набор *Д. А. Косухин*
Компьютерная верстка *Т. В. Чемоданова*
Макет *В. В. Савидов*

ЛР № 020611 от 30.12.97

Подписано в печать 01.06.2000
Бумага офсетная
Тираж 500 экз.

Печ. л. 6,5

Формат 60x90 1/16
Уч.-изд. л. 6
Заказ 583

Академия ГПС МВД России
129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4