

## Оглавление

Введение .....	5
1. Газовый обмен при внутренних пожарах.....	10
2. Основные положения интегрального метода термодинамического анализа пожара.....	18
3. Дифференциальные уравнения пожара.....	29
4. Дополнительные уравнения интегральной математической модели пожара для расчета плоскости равных давлений и расходов газов.....	35
5. Дополнительные уравнения интегральной модели пожара для расчета теплового потока в ограждения и скорости выгорания горючих материалов.....	46
6. Математическая постановка задачи прогнозирования опасных факторов пожара в помещении на основе интегральной модели.....	58
7. Расчет критических значений опасных факторов пожара в помещении.....	71
8. Определение интегральных теплотехнических параметров объемного свободно развивающегося пожара в помещении .....	89
9. Описание математической модели, реализованной в виде компьютерной программы «Интегральная модель развития пожара» .....	100
10. Инструкция по работе с программой «Интегральная модель развития пожара» .....	108

11. Изучение динамики развития опасных факторов пожара на основе интеграции схемы фрагмента здания в интегральную модель развития пожара.....	121
12. Расчет динамики развития опасных факторов пожара на основе интеграции фрагмента схемы купейного вагона в интегральную модель развития пожара .....	138
Приложения.....	149
Приложение А. Бланк для самостоятельной работы.....	149
Приложение Б. Варианты исходных данных.....	152
Приложение В. Справочные данные .....	155
Приложение Г. Поэтажные планы для работы с программным комплексом Интегральная модель развития пожара в помещении .....	159
Приложение Д. Рекомендуемые формы таблиц для подготовки данных к вводу схем в Интегральную модель развития пожара в помещении .....	170
Литература.....	173

## Введение

Прогнозирование опасных факторов пожара необходимо: для оценки своевременности эвакуации и разработке мероприятий по улучшению ее условий; при создании и модернизации систем сигнализации, оповещения и тушения пожаров; при разработке планов пожаротушения; для оценки фактических пределов огнестойкости строительных конструкций; проведении пожарно-технических экспертиз и других целей.

При пожаре опасными для человека факторами являются: пламя, высокая температура, интенсивность теплового излучения, токсичные продукты горения, дым, снижение содержания кислорода в воздухе, поскольку при достижении определенных уровней они поражают его организм, особенно при синергическом воздействии.

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что максимальная температура, кратковременно переносимая человеком в сухой атмосфере, составляет 149 °С, во влажной атмосфере вторую степень ожога может вызвать воздействие температуры 55 °С в течение 20 с и 70 °С при воздействии в течение 1 с. Плотность лучистых тепловых потоков 3500 Вт/м<sup>2</sup> вызывает практически мгновенно ожоги дыхательных путей и открытых участков кожи. Концентрации токсичных веществ в воздухе приводят к летальному исходу: окиси углерода (CO) в 1,0 % за 2–3 мин., двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) в 5 % за 5 мин., цианистого водорода (HCN) в 0,005 % практически мгновенно; при концентрации хлористого водорода (HCL) 0,01–0,015 % останавливается дыхание; при снижении концентрации кислорода в воздухе с 23 % до 16 % ухудшаются двигательные функции организма, и мускульная координация нарушается до такой степени, что самостоятельное движение людей становится невозможным, а снижение концентрации кислорода до 9 % приводит к смерти через 5 минут.

Совместное действие некоторых факторов усиливает их воздействие на организм человека. Так токсичность окиси углерода увеличивается при наличии дыма, влажности среды, снижении концентрации кислорода и повышении температуры. Синергический эффект обнаруживается и при совместном действии двуокиси азота и понижении концентрации

кислорода при повышенной температуре, а также при совместном воздействии цианистого водорода и окиси углерода.

Особое воздействие на людей оказывает дым. Дым представляет собой смесь несгоревших частиц углерода с размерами частиц от 0,05 до 5,0 мкм. На этих частицах конденсируются токсичные газы.

Для прогнозирования опасных факторов пожара в настоящее время используются следующие модели:

— интегральные (прогноз средних значений параметров состояния среды в помещении для любого момента развития пожара);

— зонные (прогноз размеров характерных пространственных зон, возникающих при пожаре в помещении и средних значений параметров состояния среды в этих зонах для любого момента развития пожара;

— полевые (дифференциальные) модели пожара (прогноз пространственно-временного распределения температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов среды, давлений и плотностей в любой точке помещения).

*Интегральная модель 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 термодинамическая система. Ограждающие конструкции (пол, потолок, стены) и наружный воздух (атмосфера) является внешней средой по отношению в этой термодинамической системе. Эта система взаимодействует с внешней средой путем тепло- и массообмена. В процессе развития пожара через одни проемы выталкивается из помещения нагретые газы, а через другие поступает холодных воздух. Количество вещества, т. е. масса газа в рассматриваемой термодинамической системе, в течение времени изменяется. Поступление холодного воздуха обусловлено работой проталкивания, которую совершает внешняя среда. Термогазодинамическая 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.

Состояние рассматриваемой термодинамической системы изменяется в результате взаимодействия с окружающей средой. 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 процесс развития пожара, значения указанных интегральных параметров состояния изменяются.

*Зонная модель пожара.* Зонный метод расчета динамики ОФП основан на фундаментальных законах природы — законах сохранения массы, импульса и энергии. Газовая среда помещений является открытой термодинамической системой, обменивающейся массой и энергией с окружающей средой через открытые проемы в ограждающих конструкциях помещения. Газовая среда является многофазной, т. к. состоит из смеси газов (кислород, азот, продукты горения и газификация горючего материала, газообразное огнетушащее вещество) и мелкодисперсных частиц (твердых или жидких) дыма и огнетушащих веществ.

В зонной математической модели газовый объем помещения разбивается на характерные зоны, в которых для описания тепломассобмена используются соответствующие уравнения законов сохранения. Размеры и количество зон выбирается таким образом, что бы в пределах каждой из них неоднородность температурных и других полей параметров газовой среды были возможно минимальными, или из каких-то других предположений, определяемых задачами исследования и расположением горючего материала.

*Полевой (дифференциальный) метод расчета.* Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поскольку он основан на решении уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчетной области. С его помощью можно рассчитать температуру,

скорость, скорость, концентрации компонентов смеси и т. п. в каждой точке расчетной области. В связи с этим полевой метод может использоваться: для проведения научных исследований в целях выявления закономерностей развития пожара; для проведения сравнительных расчетов в целях апробации и совершенствования менее универсальных и зональных и интегральных моделей, проверки обоснованности и их применения; выбора рационального варианта противопожарной защиты конкретных объектов: моделирования распространения пожара в помещениях высотой более 6 м.

В своей основе полевой метод не содержит никаких априорных допущений о структуре течения, и связи с этим принципиально применим для рассмотрения любого сценарий развития пожара.

Вместе с тем, следует отметить, что его использование требует значительных вычислительных ресурсов. Это накладывает ряд ограничений на размеры рассматриваемой системы и снижает возможность проведения многовариантных расчетов.

Поэтому, интегральный и зональный методы моделирования также являются важным инструментами в оценке пожарной опасности объектов в тех случаях, когда они обладают достаточной информативностью и сделанные при их формулировке допущения не противоречат картине развития пожара.

*Выбор конкретной модели расчета* времени блокирования путей эвакуации следует осуществлять исходя из следующих предпосылок:

— *интегральный метод*: для зданий и сооружений, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации, проведении имитационного моделирования для случаев, когда учет стохастического характера пожара является более важным, чем точное и детальное прогнозирование его характеристик; для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерным размером помещения;

— *зонный метод*: для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой; для помещений большого

объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения; для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т. д.);

— *полевой метод*: для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т. д.); для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т. д.); для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т. д.).

В представленном учебном пособии подробно описан математический аппарат интегрального метода расчета опасных факторов пожара в помещении, показано применение интегрального метода к конкретным ситуациями с пожарами в помещении.

# 1

## Газовый обмен при внутренних пожарах

*Газовый обмен на пожаре* — это движение газообразных масс, вызываемых перемещением нагретых газообразных продуктов сгорания (теплового разложения) от зоны горения и атмосферного воздуха к зоне горения.

Основными и существенными параметрами, определяющими газовый обмен на пожаре, являются:

- скорость движения воздуха или продуктов сгорания — скорость газообмена;
- интенсивность газового обмена;
- коэффициент избытка воздуха.

Нагретые продукты горения в зоне реакции, из-за меньшей плотности по сравнению с плотностью поступающего в помещение воздуха поднимаются вверх, создавая избыточное давление. В нижней части помещения из-за снижения парциального давления кислорода в воздухе, участвующего в реакции окисления, создается разрежение.

Высота в помещении, на которой давление в его объеме равно наружному или давлению в соседнем с горящим помещением, называется уровнем равных давлений. Выше этого уровня помещение заполнено дымом, ниже — концентрация продуктов горения не препятствует нахождению личного состава пожарных подразделений без средств защиты органов дыхания.

Если на уровне равных давлений в помещении провести условную плоскость, то ее можно назвать *плоскостью равных давлений*.

При пожаре в помещении наступает момент, когда плоскость равных давлений опускается ниже высоты проема, при этом часть проема работавшего только на приток к зоне горения свежего воздуха, начинает работать и на выпуск продуктов горения, снижая тем самым интенсивность поступления свежего воздуха к зоне горения.

Чем ниже располагается плоскость равных давлений, тем больший объем занимает зона задымления, возникает опасность распространения продуктов горения в смежные



с горящим помещением, возникновение в них очагов пожаров за счет теплосодержания газовой смеси.

При внутренних пожарах газовый обмен зависит от вентиляции помещения, высоты помещения, горючей загрузки, архитектурно-планировочного решения здания.

Внутри горящего помещения создаются три зоны с различными давлениями (рисунок 1.1):

- верхняя зона — с давлением газообразных продуктов сгорания выше атмосферного;
- нижняя зона — с давлением воздуха ниже атмосферного;
- нейтральная зона — с давлением равным атмосферному.

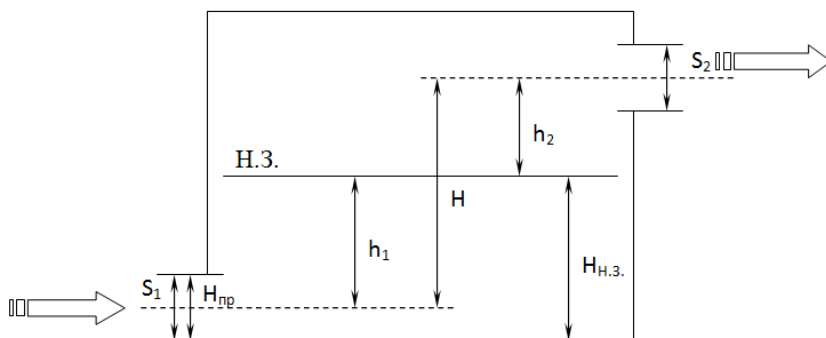


Рисунок 1.1. Расположение нейтральной зоны при газообмене через проемы расположенные на разной высоте

Чем ниже расположена нейтральная зона, тем больше зона задымления (верхняя) и концентрация дыма, а также больше возможностей для задымления соседних помещений.

На газовый обмен влияет не только открытие наружных проемов, но и их расположение, назначение, площадь, отношение площади пола к площади горения в горящем помещении.

По расположению проемы бывают нижние и верхние, од-  
норядные и двухрядные, по назначению — приточные, вытяж-  
ные и приточно-вытяжные.

Высота расположения нейтральной зоны в горящем  
помещении при газообмене через проемы расположенные  
на разной высоте определяется по формуле:

$$H_{H.3.} = 0,5H_{\text{пр}} + h_1 \quad (1.1)$$

где:  $H_{H.3.}$  — высота расположения нейтральной зоны, м;

$H_{\text{пр}}$  — высота наибольшего приточного проема, м;

$h_1$  — расстояние от оси приточного проема до нейтраль-  
ной зоны, м.

$$h_1 = \frac{H}{\left[ \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho_B}{\rho_{\text{пр}}} \right) \right] + 1}, \text{ м} \quad (1.2)$$

где:  $H$  — расстояние между центрами приточных и вытяжных  
проемов, м;

$S_1, S_2$  — соответственно площади приточного и вытяж-  
ного проемов, м<sup>2</sup>;

$\rho_B, \rho_{\text{пр}}$  — плотность соответственно атмосферного воз-  
духа и газообразных продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>.

*Из этого уравнения можно сделать следующий вывод:*

1. Чем больше расстояние между центрами приточных  
и вытяжных проемов ( $H$ ), тем выше расположена нейтральная  
зона.

2. Нейтральная зона будет расположена ближе к тем  
проемам, площадь которых больше.

3. При равенстве площадей проемов и большой разнице  
плотности воздуха и продуктов горения нейтральная зона бу-  
дет ближе к приточному проему.

С увеличением площади вытяжных отверстий значи-  
тельно увеличивается скорость газообмена. Изменяя площадь  
проемов, можно изменить не только расположение нейтраль-  
ной зоны, но и скорость выгорания.

При открытых нижних проемах (рисунок 1.2), т. е. когда они являются приточно-вытяжными, расположение нейтральной зоны определяют по формуле:

$$H_{н.з.} = \frac{H_{пр}}{\left( \sqrt[3]{\frac{\rho_B}{\rho_{ПГ}}} \right) + 1} \quad (1.3)$$

где:  $H_{пр}$  — высота наибольшего проема, м;

$\rho_B, \rho_{ПГ}$  — плотность соответственно атмосферного воздуха и газообразных продуктов горения.

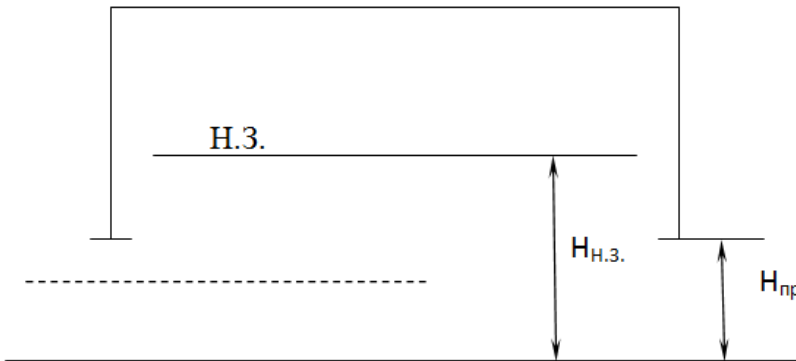


Рисунок 1.2. Расположение нейтральной зоны при газообмене через проемы расположенные на одной высоте

Чтобы ограничить развитие пожара (уменьшить скорость выгорания) необходимо до минимума сократить площадь приточных отверстий, затем, для снижения скорости притока воздуха и увеличения скорости вытяжки дыма, следует площадь вентиляционных отверстий привести в соответствие с площадью приточных отверстий.

Наиболее рациональное соотношение:

$(S_1/S_2) = 0,4-0,5$  для помещений высотой до 3 м;

$(S_1/S_2) = 0,7-1,0$  для помещений высотой более 3 м.

В этих случаях нейтральная зона будет находиться выше рабочей зоны.

Внутренние пожары протекают в ограниченном объеме, огражденном от окружающего пространства. Поэтому внутренний пожар слабее зависит от характеристик окружающей среды, т. е. погоды (таблица 1.1), и в значительной степени определяется теплогазообменом зоны горения с внутренним объемом и окружающей средой.

Эти процессы более сложные, чем в случае открытого пожара. Они главным образом, и определяют характер и динамику его развития или. Под динамикой пожара понимается изменение его основных параметров в пространстве и времени.

Значения этих параметров, а, следовательно, характеристики зон внутреннего пожара определяются теплообменом и газообменом с окружающей средой.

*Таблица 1.1*

**Факторы, влияющие  
на скорость распространения пламени  
по горючим материалам**

Свойства материала химические	Свойства материала физические	Факторы окружающей среды
Состав горючего Наличие замедлителей горения	Начальная температура. Ориентация поверхности. Направление распространения. Толщина. Теплоемкость. Теплопроводность. Плотность. Геометрия. Однородность.	Состав атмосферы. Атмосферное давление. Температура. Действующий тепловой поток. Скорость ветра.

Скорость, с которой будет развиваться внутренний пожар, зависит от того, насколько быстро может распространиться пламя от точки зажигания, вовлекая в процесс горения все возрастающие области горючего материала.

Для установления процесса горения в закрытом пространстве требуется, чтобы пожар вышел за определенные критические размеры, позволяющие резко повысить температуру на уровне потолка (типичное повышение более 600 °С). Хотя усиленные уровни излучения увеличивают локальную

скорость горения, большее влияние на увеличение размера пламени и скорость горения оказывает увеличивающаяся площадь, охваченная пожарами. Поэтому необходимо учитывать характеристики распространения пламени по горючим материалам.

Распространение пламени можно рассматривать как процесс наступления фронта горения. Внутри этого фронта передняя кромка пламени действует как источник тепла (которое нагревает горючее перед фронтом пламени до температуры воспламенения) и как источник вынужденного зажигания. Рассмотрение этого процесса требует рассмотрения стационарных задач теплообмена. Следовательно, скорость распространения пламени может зависеть как от физических свойств материалов, так и от его химического состава. В общем виде большинство внутренних пожаров может быть условно разделено на три характерных периода.

*Первый период или начальная стадия пожара* характеризуется сравнительно невысокой среднеобъемной температурой  $T_{II}$  незначительным газообменом с окружающей средой. Горение протекает за счет воздуха, содержащегося в помещении. Считается, что под начальной стадией надо понимать период развития пожара, заканчивающийся т. н. объемным воспламенением горючей нагрузки. В этом есть определенный смысл: т. к. по мере развития пожара повышается температура, прогревается горючая нагрузка и при достижении ее температуры поверхностного слоя, равной температуре вспышки, может произойти весьма быстрое (объемное) распространение горения.

*Второй или основной период* начинается от начальной стадии до момента, когда среднеобъемная температура достигает максимальных значений. В этот период сгорает основная доля пожарной нагрузки (примерно 80 %).

*Заключительный (третий) период* характеризуется снижением теплоты пожара, убыванием температуры пожара. Рост площади пожара  $F_{\text{пож}}$  замедляется или совсем прекращается. Исходя из сказанного можно графически (рисунок 1.3) представить изменения во времени основных параметров пожара: площади и среднеобъемной температуры.

Несмотря на низкую температуру на первом этапе пожара, внутри и вокруг зоны горения местные температуры достигают значительного уровня. В течение периода нарастания пожар увеличивает свои размеры, сначала достигая, а затем, проходя момент, при котором значительную роль начинает играть взаимодействие с границами помещения. Переход к полностью развитому пожару (этап 2) назван этапом полного охвата помещения пламенем, при этом пламя быстро распространяется от области местного горения на все возгораемые поверхности внутри помещения.

Соотношение времен этих периодов (длительность) может быть самой различной, т. к. оно зависит от таких факторов как величина пожарной нагрузки и интенсивность газообмена, характеризующая в данном случае отношением площади проемов ( $F_1$ ) к площади пожара ( $F_{II}$ ).

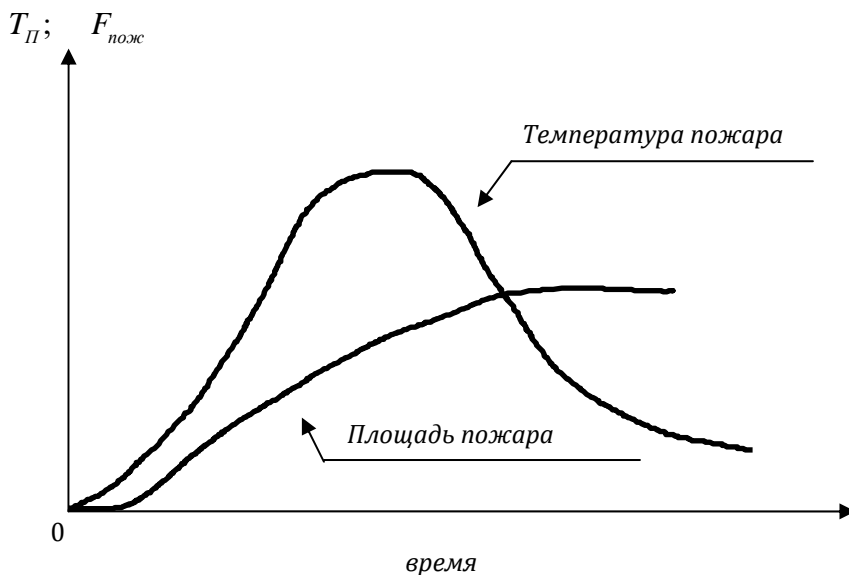


Рисунок 1.3. Изменения во времени площади и температуры пожара

На этапе полностью развитого пожара интенсивность тепловыделения достигает максимума и угроза соседним помещениям и, вероятно, соседним зданиям наибольшая. Пламя

может вырываться через окна, двери и т. д., что приводит к распространению пожара на остальную часть здания. Это распространение может носить внутренний (через открытые дверные проходы), либо внешний характер (через окна). Кроме очевидной угрозы жизни оставшихся в здании людей на данном этапе может произойти разрушение конструкции, которое может вызвать либо частичное, либо полное обрушение здания.

В период охлаждения (этап 3) интенсивность горения уменьшается по мере того, как в составе горючих веществ все меньше и меньше будет оставаться летучих продуктов. В конце концов, пламя прекратится, оставив за собой массу тлеющих в золе углей, которые, хотя и медленно, будут продолжать гореть в течение некоторого времени, в результате чего будут поддерживаться высокие местные температуры.

Большое влияние на динамику пожара оказывает такой параметр  $F_1 / F_{пола}$ , оценка которого менее трудоемка, чем  $F_1 / F_{пожара}$ . В зависимости от величины этого параметра динамику пожара может определять или значение пожарной нагрузки (в случае если  $F_1 / F_{пола} > 1/12$ ) или же газообмен (в случае если  $F_1 / F_{пола} < 1/12$ ).

*Влияние ориентации поверхности.* Наибольшая скорость распространения пламени достигается если пламя распространяется вверх. С другой стороны, при распространении пламени вниз скорость распространения пламени менее чувствительна к изменению ориентации поверхности. По мере изменения угла ориентации от  $-90^\circ$  (вертикально вниз) до  $-30^\circ$ , скорость распространения пламени остается приблизительно постоянной, но при изменении от  $-30^\circ$  до  $0^\circ$  скорость может возрастать более чем в 3 раза.

Причина такого поведения кроется в изменении характера физического взаимодействия между пламенем и зажженным материалом при изменении на ближнюю вертикальную поверхность, так как захват воздушных масс ограничен одним направлением. Следовательно, при вертикальном горении установившееся пламя будет удлиняться и заполнять пограничный слой на поверхности.

## 2

### Основные положения 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 термодинамическая система (рисунок 2.1). 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 рисунке 2.1. пунктирной линией.

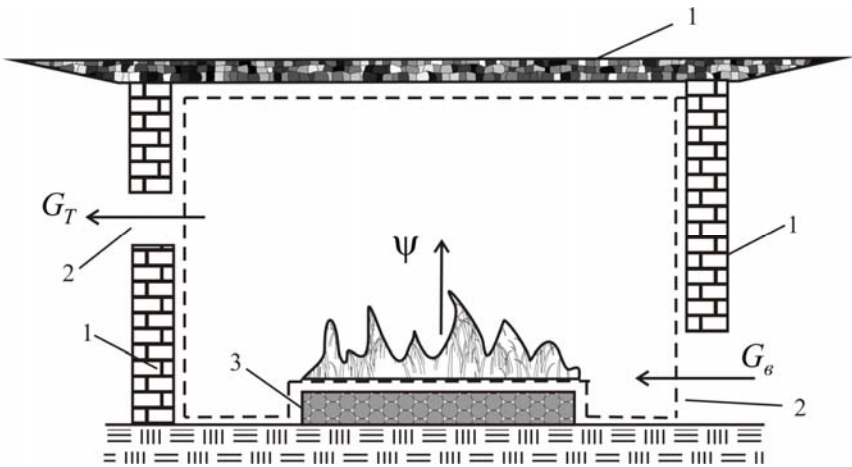


Рисунок 2.1. Схема пожара в помещении:

----- — контрольная поверхность; 1 — ограждения;  
2 — проемы (окна, двери), 3 — горящий материал;

$G_T$  — расход уходящих газов;  $G_B$  — расход поступающего  
холодного воздуха;  $\psi$  — скорость выгорания материала



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.

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<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> *Идеальный газ* — математическая модель газа, в которой в рамках молекулярно-кинетической теории предполагается, что:

1. Потенциальной энергией взаимодействия частиц, составляющих газ, можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией;

2. Суммарный объем частиц газа пренебрежимо мал;

3. Между частицами нет дальнодействующих сил притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги;

4. Время взаимодействия между частицами пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями.

В рамках термодинамики идеальными называются гипотетические (реально не существующие) газы, подчиняющиеся термическому уравнению состояния Клапейрона-Менделеева. Модель широко применяется для решения задач термодинамики газов и аэрогазодинамики.

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.:

$$P = \rho RT, \quad (2.1)$$

где  $P$  — локальное давление,  $H \cdot м^2$ ;

$\rho$  — локальная плотность,  $кг \cdot м^3$ ;

$R$  — газовая постоянная,  $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ ;

$T$  — локальная температура,  $K$ .

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 среднеобъемные параметры — среднеобъемную плотность газовой среды и среднеобъемную (удельную) внутреннюю энергию.

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

$$\rho_m = \frac{M}{V} \quad (2.2)$$

где  $M$  — масса газа, заполняющего помещение, кг;  
 $V$  — свободный объем помещения, м<sup>3</sup>.

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

Следует отметить, что:

$$M = \int_1 \rho dV. \quad (2.3)$$

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

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_1 \rho dV \quad (2.4)$$

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 1-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.:

$$\rho_{mi} = \frac{M_i}{V} \quad (2.5)$$

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.:

$$\rho_{mi} = \frac{1}{V} \int_1 \rho_i dV, \quad (2.6)$$

где  $\rho_i$  — локальное значение парциальной плотности  $i$ -го компонента,  $кг \cdot м^3$ .

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

$$u_{mi} = \frac{U}{V}, \quad (2.7)$$

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

$$u_m = \frac{1}{V} \int_1 u_r dV, \quad (2.8)$$

где  $u_r$  — локальное значение удельной (объемной) внутренней энергии  $Дж \cdot м^3$ .

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

$$u_r = \rho u, \quad (2.9)$$

где  $u$  — локальное значение удельной массовой внутренней энергии газа  $Дж \cdot кг^1$ .

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

$$u = c_v T, \quad (2.10)$$

где  $c_v$  — изохорная теплоемкость газа, Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

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 (2.8) можно преобразовать с помощью выражений (2.9) и (2.10):

$$u_m = \frac{1}{V} \int_1 c_v \rho T dV. \quad (2.11)$$

Если теперь воспользоваться уравнением Клапейрона (2.1), то формулу (2.11) можно преобразовать и получить следующее выражение:

$$u_m = \frac{1}{V} \int_1 \frac{1}{k-1} p dV. \quad (2.12)$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  — 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, тогда, формулу 2.12 можно преобразовать:

$$u_m = \frac{1}{k-1} \left[ \frac{1}{V} \int_V p dV \right]. \quad (2.13)$$

Выражение в прямоугольных скобках представляет собой операцию осреднения всех локальных значений давления

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)