TP-5045

ПРОТИВОДЫМНАЯ ЗАЩИТА АТРИУМНЫХ ЗДАНИЙ

Обзор зарубежных источников

СИТИС

Строительные Информационные Технологии и Системы
www.sitis.ru

ТР-5045

Противодымная защита атриумных зданий.

Обзор зарубежных источников.

Редактор:

Грачев В.Ю.

Переводчики:

Борноволокова Е. А.
Патрушева Н. А.
Слепушкин В. А.
Грачева Д. В.

© ООО «СИТИС», 2009 г.
© Грачев В.Ю., 2009 г.

ООО «СИТИС»
620028 Екатеринбург, ул. Долорес Ибаррури, 2
Тел: 310-00-99 e-mail: support@sitis.ru
www.sitis.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ 3
ПРЕДИСЛОВИЕ 4
ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ 5
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 6
СОКРАЩЕНИЯ 7
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ 8
ПРИНЦИПЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ 9
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ 9
СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ В АТРИУМАХ 31
ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ 52
NFPA 92B. РУКОВОДСТВО ПО СИСТЕМАМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ, МОЛЛОВ И БОЛЬШИХ ПОМЕЩЕНИЙ 63
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ 63
ФАКТОРЫ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ 66
МЕТОДЫ РАСЧЁТА 74
ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ 89
ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ 91
СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ 94
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ПОЖАРЕ 107
КВАДРАТИЧНЫЕ ПОЖАРЫ 119
ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИ ПОМОЩИ УРАВНЕНИЙ, ПРИВЕДЁННЫХ В СТАНДАРТЕ NFPA 92B 121
NFPA 5000. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЕ АТРИУМОВ И СМЕЖНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ 125
АТРИУМЫ 125
СМЕЖНЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ 125
IBC 2003. ПРОТИВОДЫМНАЯ ЗАЩИТА АТРИУМОВ И ЗДАНИЙ КРЫТЫХ МОЛЛОВ 127
ЗДАНИЯ КРЫТЫХ МОЛЛОВ 127
АТРИУМЫ 130
СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ 131
РУКОВОДСТВО К IBC 2003. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЕ 142
СТАДИИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА 142
СКОРОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ГОРЕНИИ РАЗНЫХ ПРЕДМЕТОВ 143
РЕГУЛИРУЕМЫЕ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ ПОЖАРЫ 147
СПРИНКЛЕРЫ 148
РАСЧЕТНЫЕ ПОЖАРЫ 151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 158

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современных российских строительных нормах и руководствах аспекты противодымной защиты атриумов и больших помещений освещены в небольшом объеме, что вызывает много вопросов при проектировании, экспертизе, строительстве и эксплуатации атриумных зданий. В данном обзоре приводится описание подходов, принятых в зарубежной практике, и выдержки из ряда строительных норм по соответствующим вопросам. Эта информация может помочь специалистам при разработке и уточнении принимаемых решений.

В обзор включены теоретические основы из книги американских специалистов Джона Клоута и Джеймса Милке «Принципы противодымной защиты», положения зарубежных строительных норм IBC 2003 и NFPA 5000, стандарта NFPA 92B и ряда других источников.

Обзор не претендует на всеобъемлющее и объективное описание данной проблематики, а является только изложением информации из источников по теме, которые были обобщены составителями обзора.

Коллектив авторов

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ

Обзор «Противодымная защита атриумных зданий» составлен на основе информации, изложенной в следующих зарубежных источниках:

- Книга Дж. Клоута и Дж. Милке «Принципы противодымной защиты»;
- Стандарт Национальной ассоциации по противопожарной защите (США) - NFPA 92B «Руководство по системам противодымной защиты атриумов, торговых центров и больших помещений»;
- NFPA 5000 «Строительные нормы и правила»;
- Стандарт NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации»;
- Книга Э. Бученена «Противопожарное проектирование конструкций»;
- IBC 2003 «Международные строительные нормы»;
- Руководство «Требования к противодымной защите в Международных строительных нормах IBC 2003», Эванс Д. и Клоут Дж.

В тексте сохранены порядок изложения и стилистика зарубежных источников.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Атриум (*atrium*) – большое свободное пространство, образованное одним или несколькими проемами в перекрытиях, объединяющими два и более этажа, покрытое над проемами кровлей и используемое для различных целей, но не в качестве огражденной лестницы, шахты лифта, проема для эскалатора, шахты для размещения инженерных коммуникаций, таких как водопровод, электропроводка, системы кондиционирования воздуха или средства связи [NFPA 92B] (и не являющееся моллом. [IBC 2003])

Безопасные условия *(tenable environment)* – условия, при которых распространение дыма и тепла ограничено, либо их влияние на людей сокращено так, чтобы их уровень не представлял угрозу жизни людей. [NFPA 92B]

Большое помещение *(large-volume space)* – не разделенное на отсеки пространство высотой обычно в два или более этажа, внутри которого дым от пожара, будь то в самом помещении или в смежном с ним помещении, может беспрепятственно перемещаться и накапливаться. [NFPA 92B]

Верификация модели (*model verification*) – процесс установления, что реализация расчетного метода точно отражает концептуальное описание расчетного метода, сделанное разработчиком, и решение к расчетному методу. Основной стратегией проверки вычислительных моделей является выявление и оценка ошибки в вычислительной модели и её решении. [NFPA 92B]

Граница дымового слоя *(smoke layer interface)* – теоретическая граница между дымовым слоем и незадымленным воздухом. На практике граница дымового слоя является расчётной границей внутри переходной зоны, которая может достигать нескольких десятков сантиметров в толщину. Под расчетной границей плотность дыма в переходной зоне снижается до нуля. [NFPA 92B]

Дым *(smoke)* – смесь твердых и жидких частиц и газов, возникающих при пиролизе или горении материала, вместе с вовлекаемым воздухом или воздухом иным образом смешивающимся с этой массой. [NFPA 92B]

Дымовой слой *(smoke layer)* – скопление дыма под физической или тепловой преградой. Дымовой слой не является однородной смесью и не имеет одинаковой температуры. Представленные в обзоре методы расчета могут допускать наличие однородных условий. Дымовой слой включает в себя переходную зону, которая неоднородна и отделяет горячий верхний слой дыма от незадымленного воздуха. [NFPA 92B]

Дымозащитная преграда *(smoke barrier)* – непрерывная перегородка, вертикальная или горизонтальная, такая как элемент стены, пола или потолка, спроектированная и возведенная с целью ограничения перемещения дыма. Дымозащитная преграда может иметь или не иметь класс огнестойкости. Такие преграды могут иметь защищенные проёмы. [NFPA 92B]

Дымозащитный клапан *(smoke damper)* – устройство для предотвращения проникновения воздуха или дыма. [NFPA 92B]

Здание крытого молла (*covered mall building*) – отдельное здание, вмещающее ряд арендаторов и пользователей, например, магазины, предприятия общественного питания, развлекательные и игровые зоны, пассажирские транспортные терминалы, офисы и другие аналогичные предприятия, где два или более пользователя имеют основной вход в одну или несколько галерей. В контексте международных строительных норм якорные здания не рассматриваются как часть здания крытого молла. [IBC 2003]

Изолированные помещения *(separated spaces)* – помещения внутри здания, изолированные от больших помещений дымозащитными преградами, которые не зависят от воздушного потока в плане ограничения перемещения дыма. [NFPA 92B]

Квадратичный пожар *(t-squared fire)* – пожар, при котором скорость горения изменяется пропорционально квадрату времени. [NFPA 92B]

Комплексная проверка *(end-to-end verification)* – метод самодиагностики, дающий положительное подтверждение, что желаемый результат (т.е. поток воздуха или положение клапана) достигнут при активации контролируемого устройства, например, во время дымоудаления, тестирования или ручной корректировки. Отсутствие или прекращение такого положительного подтверждения указывает на сбой системы. [NFPA 92B]

Крытый молл *(covered mall)* – крытая внутренняя зона или зона с кровлей, используемая в качестве пешеходной зоны, и соединённая со зданием (зданиями) или частями здания с одним или многими арендаторами. [NFPA 92B]

Молл (*mall*) – крытая сверху крышей или перекрытием общая пешеходная зона внутри здания крытого молла, в которой располагаются два или более пользователей, не превышающая трех этажей, выходящих в общее пространство. [IBC 2003]

Общая арендная площадь (*gross leasable area*) – общая площадь этажа, предназначенная для аренды и эксплуатации. Площадь арендных помещений измеряется от средних линий разделительных перегородок до внешней границы наружных стен арендного помещения. В расчете общей арендной площади должны учитываться все используемые площади, включая складские помещения. [IBC 2003]

Первые признаки дыма *(first indication of smoke)* – граница между переходной зоной и незадымлённым воздухом. Уравнения (3) и (4) используются для прогнозирования высоты этой границы для заполнения дымом (задымления) при отсутствии механического дымоудаления. [NFPA 92B]

Переходная зона *(transition zone)* – слой между границей дымового слоя и уровнем первых признаков дыма, в котором температура дымового слоя снижается до температуры окружающей среды. [NFPA 92B]

Припотолочная струя *(ceiling jet)* – поток дыма под потолком, растекающийся радиально от места соприкосновения с потолком основной струи от огня. Как правило, температура припотолочной струи выше температуры прилегающего дымового слоя. [NFPA 92B]

Руководство *(guide)* – документ, имеющий рекомендательный или справочный характер, содержащий необязательные условия. Руководство может включать в себя обязательные положения, например, о случаях его применения, но в целом как документ оно не подлежит узакониванию. [NFPA 92B]

Система противодымной защиты *(smoke management system)* – спроектированная система, включающая в себя все методы, которые могут использоваться как по отдельности, так и в совокупности для корректирования перемещения дыма. [NFPA 92B]

Смежное помещение *(communicating space)* – помещение в здании, напрямую выходящее в большое помещение либо соединенное с ним открытыми проходами так, что дым от пожара либо в смежном помещении, либо в большом помещении может без ограничений перемещаться из одного помещения в другое. [NFPA 92B]

Фудкорт (*food court*) – общественная зона в молле, обслуживаемая расположенными рядом помещениями для приготовления пищи. [IBC 2003]

Эффект прокалывания *(plugholing)* – подсасывание незадымленного воздуха в вытяжную противодымную вентиляцию из-под дымового слоя за счет высокой скорости дымоудаления. [NFPA 92B]

Эффект тяги *(stack effect)* – вертикальный воздушный поток в зданиях, возникающий за счёт разности плотностей вследствие перепада температур снаружи и внутри здания или между двумя помещениями внутри здания. [NFPA 92B]

Якорное здание (*anchor building*) – внешнее обрамляющее здание всех групп, кроме группы H, с прямым доступом в здание крытого молла и независимыми от молла необходимыми путями эвакуации. [IBC 2003]

СОКРАЩЕНИЯ

HRR (Heat Release Rate) – скорость выделения тепла, мощность тепловыделения.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Anchor building	якорное здание
Atrium	атриум
Ceiling jet	припотолочная струя
Communicating space	смежное помещение
Covered mall building	здание крытого молла
Covered mall	крытый молл
End-to-end verification	комплексная проверка
First indication of smoke	первые признаки дыма
Food court	фудкорт
Gross leasable area	общая арендная площадь
Guide	руководство
Heat release rate (HRR)	скорость выделения тепла (HRR)
Large volume space	большое помещение
Mall	молл
Model verification	верификация модели
Plugholing	эффект прокалывания
Separated space	изолированное помещение
Smoke barrier	дымозащитная преграда
Smoke damper	дымозащитный клапан
Smoke layer	дымовой слой
Smoke layer interface	граница дымового слоя
Smoke management system	система противодымной защиты
Smoke	дым
Stack effect	эффект тяги
Tenable environment	безопасные условия
Transition zone	переходная зона
T-squared fire	квадратичный пожар

ПРИНЦИПЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ

Информация в данной главе представлена на основе книги Дж.Клоута и Дж.Милке «Принципы противодымной защиты» [6].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ

В последние годы строительство атриумов стало обычным явлением. К другим большим открытым пространствам относятся крытые моллы, аркады, спортивные комплексы, выставочные залы и ангары. Методы, описанные в этом и следующем разделе, применимы и к этим пространствам. Как было упомянуто выше, термин «атриум» используется здесь в обобщающем смысле и применяется к любому из этих больших пространств.

Большинство положений, применяемых в сфере противодымной защиты, напрямую связаны с зонным моделированием пожаров или исходят из основ зонного моделирования пожаров. В данном разделе представлены основные положения противодымной защиты атриумов, включая динамику струи дыма, «эффект прокалывания» дымового слоя (подсасывание воздуха из незадымлённого слоя ниже уровня дыма), горизонтальный поток дыма, подпор воздуха для предотвращения обратного потока дыма, и эмпирические уравнения по задымлению.

Осесимметричная струя

Большинство людей наблюдали за дымом, поднимающимся от сигареты, и видели, как дым слегка клубится около сигареты и затем распрямляется на некоторой высоте от неё. Для больших пожаров, которые представляют особый интерес в плане противодымной защиты, характерны струи дыма, которые пульсируют и образуют много клубов по мере того, как дым поднимается вверх.

Мортон, Тейлор и Тёрнер (Morton, Taylor and Turner, 1956 [8]) разработали классический анализ среднего по времени потока струй. Они рассматривали струю, исходящую из точечного источника (или линейного источника). Что касается высоты струи, они считали, что воздух, захваченный на краю струи, пропорционален некоторой характеристической скорости струи на этой высоте. Колебания плотности в струе считались малыми по сравнению с плотностью окружающей среды. Профили средней скорости по вертикали и средней выталкивающей силы в горизонтальном сечении рассматривались как имеющие сходную форму на всех высотах. На рис.13.1 изображена струя рядом с теоретической моделью струи.

Струя на рис.13.1 называется осесимметричной. Другие исследователи продолжили работу Мортона, Тейлора и Тёрнера и разработали модели турбулентных струй, возникающих при пожарах в строящихся помещениях (например, McCaffrey, 1983 [9]; Cetegan et al., 1982 [10]; Heskestad, 1984 [12]). Уравнение струи, предложенное Хескестадом, и другие его работы в этой области легли в основу многих инструкций и стандартов в США.

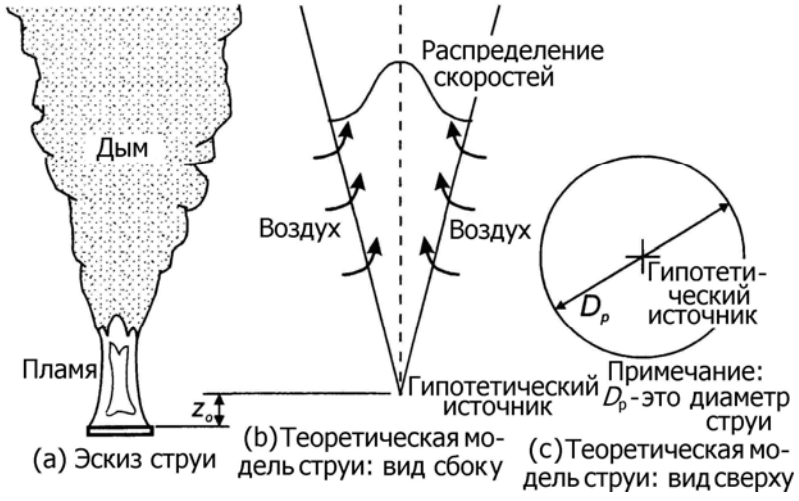


Рис. 13.1 Осесимметричная струя из точечного источника (a) эскиз, (b) теоретическая модель: вид сбоку, и (c) теоретическая модель: вид сверху

Массовый расход с поправкой на гипотетический источник возгорания

Уравнение Хескестада для массового расхода осесимметричной струи выглядит так:

$$\dot{m} = 0{,}071\ \dot{Q}_c^{1/3}(z - z_0)^{5/3}\left[1 + 0{,}026\ Q_c^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right] \quad \text{для } (z \geq z_1) \tag{13.1}$$

и

$$\dot{m} = \frac{0{,}0054\dot{Q}_c z}{0{,}166\dot{Q}_c^{\ 2/5} + z_0} \quad \text{для } z < z_1 \tag{13.2}$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход в осесимметричной струе на высоте, кг/с;

$\dot{Q}_c$ = конвективная теплоотдача при пожаре, кВт;

z = высота над топливом, м;

z_0 = поправка на гипотетический источник осесимметричной струи, м;

z_1 = средняя высота пламени, м.

Поскольку по заданному определению дым включает в себя воздух, захваченный с продуктами сгорания, весь массовый расход в осесимметричной струе определяется как дым. Отсюда следует, что эти уравнения могут рассматриваться как уравнения для генерации дыма при пожаре. Упрощённые уравнения массового расхода для осесимметричной струи будут представлены далее, и к ним применимы эти же замечания.

По условию осесимметричной струи пожар имеет круговую форму, и во многих экспериментальных исследованиях использовались пожары пролива в круглых резервуарах. Однако, пожар не обязательно должен быть круговой формы, чтобы можно было применять уравнения осесимметричной струи. Расчётный диаметр пожара может быть выражен следующим образом:

$$Df = 2\sqrt{A/\pi} \tag{13.3}$$

где *A* – площадь пожара. На некотором расстоянии над огнём струя дыма от пожара, не являющегося круговым, будет почти такой же, что и при круговом пожаре.

Гипотетический источник возгорания

Соотношение Хескестада (Heskestad, 1983 [11]) для гипотетического источника z_0 выглядит так:

$$z_0 = 0{,}083\dot{Q}_{2/5} - 1{,}02\,D_f \tag{13.4}$$

где

$\dot{Q}$ = теплоотдача пожара, кВт;

D_f = диаметр пожара, м.

На рис.13.1 гипотетический источник показан над топливом, но он также может быть и под топливом. Правило знаков: для гипотетического источника над поверхностью топлива, z_0 - положительно, а для гипотетического источника под поверхностью топлива z_0 - отрицательно. Конвективная составляющая теплоотдачи $\dot{Q}_c$ может быть выражена так:

$$\dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q} \tag{13.5}$$

где χ_c – доля конвективной теплоотдачи. Доля конвективной теплоотдачи варьируется от приблизительно 0,15 до 0,9; в большинстве программных средств для проектирования используется значение χ_c = 0.7.

Высота пламени

Уравнения (13.1) и (13.2) зависят от средней высоты пламени при пожаре. Высота пламени зависит от геометрии пожара, внешних условий, выделяемой при сгорании теплоты и стехиометрического отношения. Соотношение (Heskestad, 2002 [14]) для высоты пламени, которое может использоваться для многих видов топлива, выглядит так:

$$z_1 = 0{,}235\ \dot{Q}^{\,2/5} - 1{,}02\ D_f \tag{13.6}$$

где

z_1 = средняя высота пламени, м.

В данном случае высота пламени – это высота, на которой максимальная температура струи равна 500 K. Высота потолков в атриумах относительно большая, поэтому для противодымной защиты атриумов характерно то, что интересующие нас значения высоты, z, значительно больше гипотетического источника, z_0, или высоты пламени, z_1.

Температура струи по осевой линии

Температура варьируется по поперечному сечению, с наибольшим значением по осевой линии струи, как показано на рис.13.2. Температура по осевой линии представляет интерес в необычных случаях, когда испытания атриумов проводятся с применением настоящего пожара. Уравнение температуры по осевой линии (Heskestad, 1986 [13]) выглядит так:

$$T_{cp} = T_0 + 9{,}1\left(\frac{T_0}{g C_p^{\ 2} \rho_a^{\ 2}}\right)^{1/3} \frac{\dot{Q}_c^{\ 2/3}}{(z - z_0)^{5/3}} \qquad (13.7)$$

где

T_{cp} = абсолютная температура осесимметричной струи по оси на высоте z, K;

T_0 = абсолютная температура окружающей среды, K;

ρ_a = плотность окружающего воздуха, кг/м^3;

g = ускорение силы тяжести, м/с^2.

При условии 294 K, ρ_a = 1,2 кг/м^3, g = 9,8 м/с^2 и C_p = 1,00 кДж/кг °C, уравнение (13.7) выглядит так:

$$T_{cp} = T_0 + 25\frac{\dot{Q}_c^{\ 2/3}}{(z - z_0)^{5/3}} \qquad (13.8)$$

где

T_p = температура осесимметричной струи по оси на высоте z, °C;

T_0 = температура окружающей среды, °C.

Рис. 13.2 Изменение радиальной температуры осесимметричной струи

Диаметр струи

Учитывая то, что струя пожара состоит из клубов дыма, определить диаметр струи сложно. Определение диаметра струи строится на зрительном наблюдении и температурах. Согласно одному из определений, данный диаметр – это положение, при котором температура струи сократилась до некоторой доли температуры по осевой линии. Следующее уравнение отражает ожидаемые пределы диаметра (рис. 13.1) осесимметричной струи:

$$D_p = \frac{z}{C_{PD}} \qquad (13.9)$$

где

D_p = диаметр видимой осесимметричной струи, м;

z = высота над топливом, м;

C_{PD} = коэффициент диаметра струи от 2 до 4.

Это уравнение демонстрирует, что диаметр осесимметричной струи может значительно варьироваться. В связи с этим, предлагается выбрать значение C_{PD}, чтобы получить устойчивые результаты расчетов.

Осесимметричная струя без z_0

Уравнения осесимметричной струи, которые не учитывают гипотетический источник возгорания, часто применяются для атриумов, поскольку z значительно больше z_0. Упрощенные уравнения приводятся ниже, а результаты такого упрощения мы обсудим далее.

Массовый расход

$$\dot{m} = 0,071\ \dot{Q}_c^{\,1/3} z^{5/3} + 0,0018\ \dot{Q}_c \quad \text{для } z \geq z_1 \tag{13.10}$$

и

$$\dot{m} = 0,032\ \dot{Q}_c^{\,3/5} z \quad \text{для } z < z_1 \tag{13.11}$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход в осесимметричной струе на высоте z, кг/с;

$\dot{Q}_c$ = конвективная теплоотдача при пожаре, кВт;

z = высота над топливом, м;

z_1 = средняя высота пламени, м.

Следует отметить, что когда z меньше z_1, условие z намного больше z_0, возможно, не будет соблюдаться. Тем не менее, отдельное уравнение для $z<z_1$ приводится выше для полноты картины.

Высота пламени

$$z_1 = 0,166\dot{Q}_c^{\,2/5} \tag{13.12}$$

Температура по осевой линии:

$$T_{cp} = T_0 + 9,1\left(\frac{T_a}{gC_p^{\,2}\rho_a^{\,2}}\right)^{1/3} \frac{\dot{Q}_c^{\,2/3}}{z^{5/3}} \tag{13.13}$$

где

T_{cp} = абсолютная температура осесимметричной струи по оси на высоте z, K

T_0 = абсолютная температура окружающей среды, K;

ρ_a = плотность окружающего воздуха, кг/м^3;

g = ускорение силы тяжести, м/с^2.

При условии 294 K, ρ_a = 1,2 кг/м^3, g = 9,8 м/с^2, и C_p = 1,00 кДж/кг °C, уравнение (13.13) выглядит так:

$$T_{cp} = T_0 + 25\frac{\dot{Q}_c^{\,2/3}}{z^{5/3}} \tag{13.14}$$

где

T_{cp} = температура осесимметричной струи по оси на высоте z, °C;

T_0 = температура окружающей среды, °C.

Пример 13.1 Простые расчёты струи

При пожаре мощностью 4220 кВт, каков массовый расход и температура струи по оси, если z=10,7 м над топливом, конвективная доля 0,7 и температура окружающей среды 22°C ?

Согласно уравнению (13.5), конвективная теплоотдача составляет:

$$\dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q} = 0,7(4220) = 2954 \text{ кВт.}$$

Согласно уравнению (13.12), средняя высота пламени равна:

$$z_1 = 0,166\,\dot{Q}_c^{\,2/5} = 0,166(2954)^{0,4} = 4 \text{ м.}$$

Поскольку z_1 < z, массовый расход струи рассчитывается по уравнению (13.10):

$$\dot{m} = 0,071\dot{Q}_c^{\,1/3} z^{5/3} + 0,0018\dot{Q}_c = 0,071(2954)^{1/3}(10,7)^{5/3} + 0,0018(2954) = 58,2 кг/с.$$

Согласно уравнению (13.14), температура струи по оси равна:

$$T_{cp} = T_0 + 25\frac{\dot{Q}_c^{\,2/3}}{z^{5/3}} = 22 + 25\frac{(2954)^{2/3}}{(10{,}7)^{5/3}} = 121^{\circ}C$$

Обсуждение

Цель данного раздела - оценить влияние пренебрежения поправкой на гипотетический источник возгорания. Чтобы это сделать, необходимо обратиться к диаметру пожара. Плотность теплоотдачи пожара: $q = \dot{Q}/A$. Подставив это соотношение в уравнение (13.3), получаем следующее уравнение для расчетного диаметра:

$$D_f = 2\sqrt{\frac{\dot{Q}}{\pi q}} \qquad (13.15)$$

В таблице 2 «Скорость выделения тепла при горении некоторых материалов на единицу площади» (см. раздел «Расчётные пожары» в главе «Руководство к IBC 2003. Требования к противодымной защите») представлены значения скорости выделения тепла на единицу площади для некоторых складских материалов и пожаров пролива. В этой таблице *q* колеблется от 90 кВт/м^2 до 14,000 кВт/м^2. Низкое значение - для фирменного силиконового трансформаторного масла, а наивысшее значение – для полистироловых сосудов в картонных коробках с ячейками, поставленных друг на друга и достигающих в высоту 4,57 м. Такие крайние варианты горючих материалов вряд ли встречаются в атриумах, и если их исключить, остаются значения *q* в диапазоне от 400 кВт/м^2 до 10000 кВт/м^2.

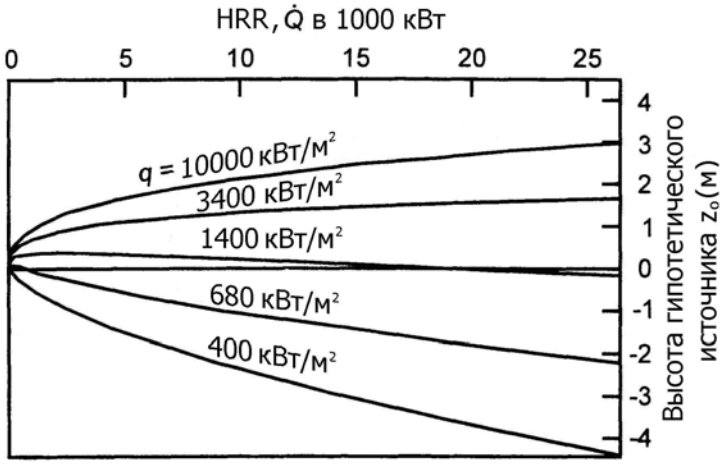


Рис. 13.3 Влияние скорости выделения тепла на единицу площади, q, на гипотетический источник возгорания

На рис.13.3 показано воздействие скорости выделения тепла на единицу площади, *q,* на расположение гипотетического источника. Для 400 кВт/м^2, значение z_0 равно приблизительно –0,8 м при $\dot{Q}$ = 2000 кВт и –4,3 м при $\dot{Q}$ =25000 кВт. Отрицательные значения z_0 указывали, что гипотетический источник находится ниже поверхности пожара. Для 10000 кВт/м^2, z_0 составляет около 1,2 м при $\dot{Q}$ = 2000 кВт и 3 м при $\dot{Q}$ =25000 кВт.

На рис.13.4 показано, как поправка на гипотетический источник влияет на массовый расход для *q* = 400 кВт/м^2 и *q* =10000 кВт/м^2. Игнорирование поправки на гипотетический источник приводит к перепрогнозированию для *q* = 400 кВт/м^2 и недопрогнозированию для *q* = 10000 кВт/м^2. Эти пере- и недопрогнозирования имеют отношение к уравнению (13.1).

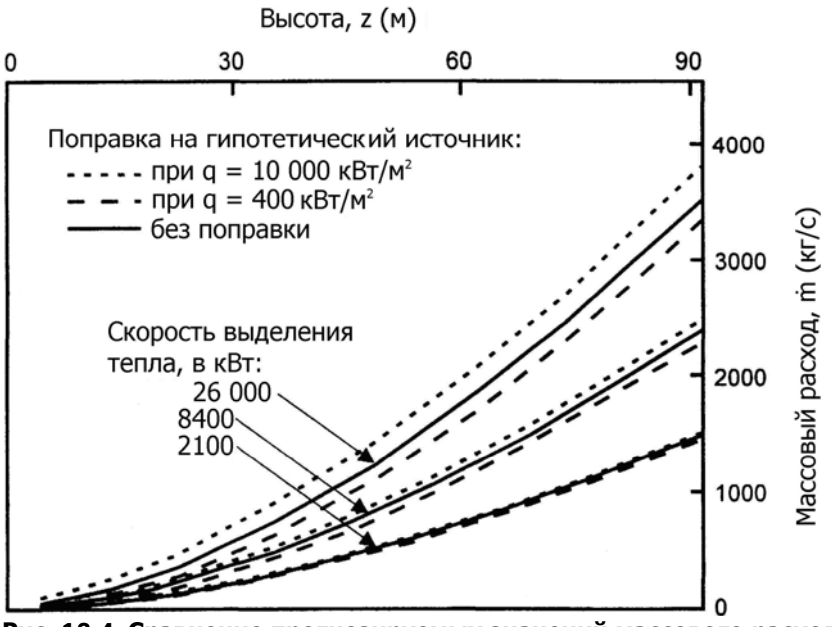


Рис. 13.4 Сравнение прогнозируемых значений массового расхода с поправкой на гипотетический источник возгорания и без нее

Оценка погрешности уравнения (13.1) недоступна, но следует отметить, что состояние технологии струи таково, что вышеприведённый диапазон может быть в зоне погрешности уравнения (13.1). В дальнейшем, распространение пожара, расходящегося из одного центра, может привести к возникновению поблизости нескольких пожаров, когда отдельные струи, поднимаясь, соединяются вместе. Для таких множественных струй пожара еще предстоит разработать теории. Безусловно, оба уравнения (13.1) и (13.10) отражают важные направления массового расхода, являющегося сильной функцией высоты, z, и слабой функцией конвективной теплоотдачи, $\dot{Q}_c$. Однако, при использовании уравнения (13.10), рекомендуется выбрать заниженное место расположения источника возгорания. Например, в ситуации, когда возникновение пожара возможно на любом уровне от пола до 3 м над уровнем пола, заниженным выбором поверхности возгорания является пол.

На рис.13.5 сравниваются прогнозируемые высоты пламени из уравнения (13.6) с приближенным соотношением уравнения (13.12). Вновь приближенное соотношение находится в центре диапазона прогнозируемых значений. Очевидно, что высота пламени, z_1, возрастает с *q.* В сфере противодымной защиты при проектировании атриумов высота пламени в основном используется, чтобы удостовериться в том, что уравнения массового расхода в струе являются целесообразными. Высота пламени, z_1, варьируется от 2,4 м до 4,4 м при 2100 кВт и от приблизительно 4,3 м до 12 м при 26000 кВт.

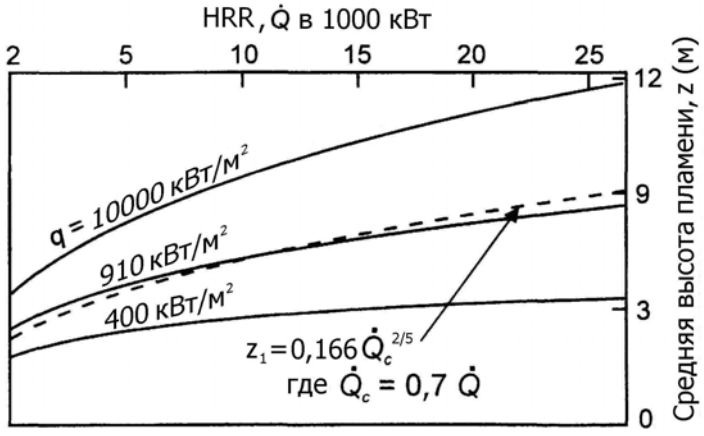


Рис. 13.5 Сравнение значений средней высоты пламени с поправкой на гипотетический источник возгорания и без нее

Пристенные и угловые струи

Огонь, разгоревшийся у стены, захватывает воздух в меньшем периметре, чем огонь, расположенный вдали от стены. Пристенная и угловая струя могут считаться половиной осесимметричной струи (рис.13.6). Таким образом, массовый расход пристенной струи является половиной массового расхода осесимметричной струи, но аналогичный пожар для осесимметричной струи в два раза превышает значения для «реального» пожара, вызывающего пристенную струю. Массовый расход для пристенной струи можно рассчитать следующим образом:

1. Пусть $\dot{Q}$ в два раза больше значения для пристенной струи.
2. Примените уравнение струи для расчета массового расхода, $\dot{m}$, осесимметричной струи.
3. Генерация дыма пристенной струи составляет $\dot{m}/2$.

Такой подход даёт неточные результаты для высот в диапазоне высоты пламени, но расчёт массового расхода становится более реалистичным при бóльших значениях высоты, *z.* Данный подход может быть применим к любой модели осесимметричной струи, но в целях согласованности с информацией, изложенной выше, $\dot{m}$ будет рассчитываться по уравнению (13.10).

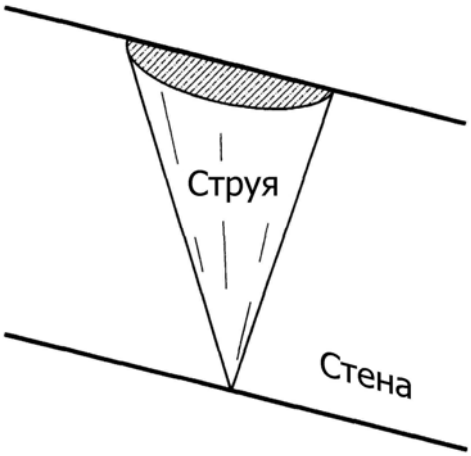
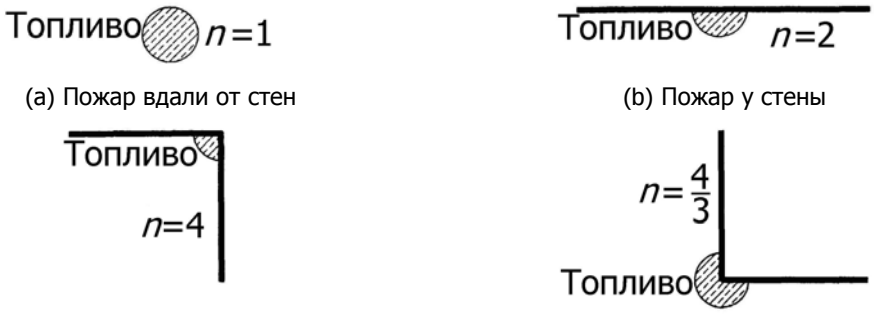


Рис. 13.6 Пристенный пожар



(a) Пожар вдали от стен (b) Пожар у стены

(c) Пожар во внутреннем углу (d) Пожар во внешнем углу

Рис. 13.7 Конфигурации пожаров по отношению к стенам

Описанный выше подход может быть применён и к струям угловых пожаров. При относительно больших высотах над топливом, уравнение (13.10) может быть расширено, и применяться в качестве *общего уравнения для пристенных струй.*

$$\dot{m} = \frac{1}{n}\left[0{,}071 n^{1/3} \dot{Q}_c^{\,1/3} z^{5/3} + 0{,}0018 n \dot{Q}_c\right] \quad \text{для } z \geq z_1 \qquad (13.16)$$

где n – показатель расположения пожара, который отражён на рис.13.7.

Пример 13.2 Пристенные и угловые струи

При $\dot{Q}$, z *и* χ_c *из* примера 13.1, каков массовый расход струи для каждого из мест расположения пожара, показанных на рис.13.7?

Массовые расходы рассчитываются на основе уравнения (13.16) следующим образом:

		Массовый расход, $\dot{m}$
		кг/с
Пожар вдали от стен	1	55
Пожар во внешнем углу	4/3	46
Пожар у стены	2	35
Пожар во внутреннем углу	4	23

Предполагается, что массовый расход, рассчитанный по уравнению (13.16) для пожара вдали от стен, такой же, как массовый расход в осесимметричной струе в примере 13.1. Наличие стены или угла снижает подсос воздуха к струе, поэтому массовый расход этих струй меньше, чем в осесимметричной струе.

Струи, проникающие с балкона

Растекающиеся балконные струи возникают при пожаре, когда дым распространяется под балконом и проникает в атриум (рис. 13.8). Когда пожар возникает в помещении, которое имеет выход на балкон, коэффициент массового расхода может приблизительно равняться следующему:

$$\dot{m} = 0{,}36(\dot{Q}W^2)^{1/3}(z_b + 0{,}25H) \qquad (13.17)$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход в струе на высоте z_b, кг/с;

$\dot{Q}$ = скорость выделения тепла, кВт;

W = ширина струи, растекающейся под балконом, м;

z_b = высота над балконом, м;

H = высота балкона над поверхностью топлива, м.

Когда z_b больше ширины приблизительно в 13 раз, предполагается, что растекающаяся балконная струя имеет такую же скорость дымообразования, что и осесимметричная струя. Следовательно, если z_b > 13W, скорость дымообразования от растекающейся балконной струи должна рассчитываться на основе уравнения (8) (см. подраздел «Осесимметричные струи» в разделе «Методы расчёта» главы «Принципы противодымной защиты атриумов»)

При использовании противодымовых штор (рис. 13.8), ширина, W, растекающейся струи – это расстояние между шторами. При отсутствии противодымовых штор может использоваться следующая аппроксимация:

$$W = w + b \qquad (13.18)$$

где

w = ширина проёма горящего помещения, м;

b = расстояние от проёма до края балкона, м.

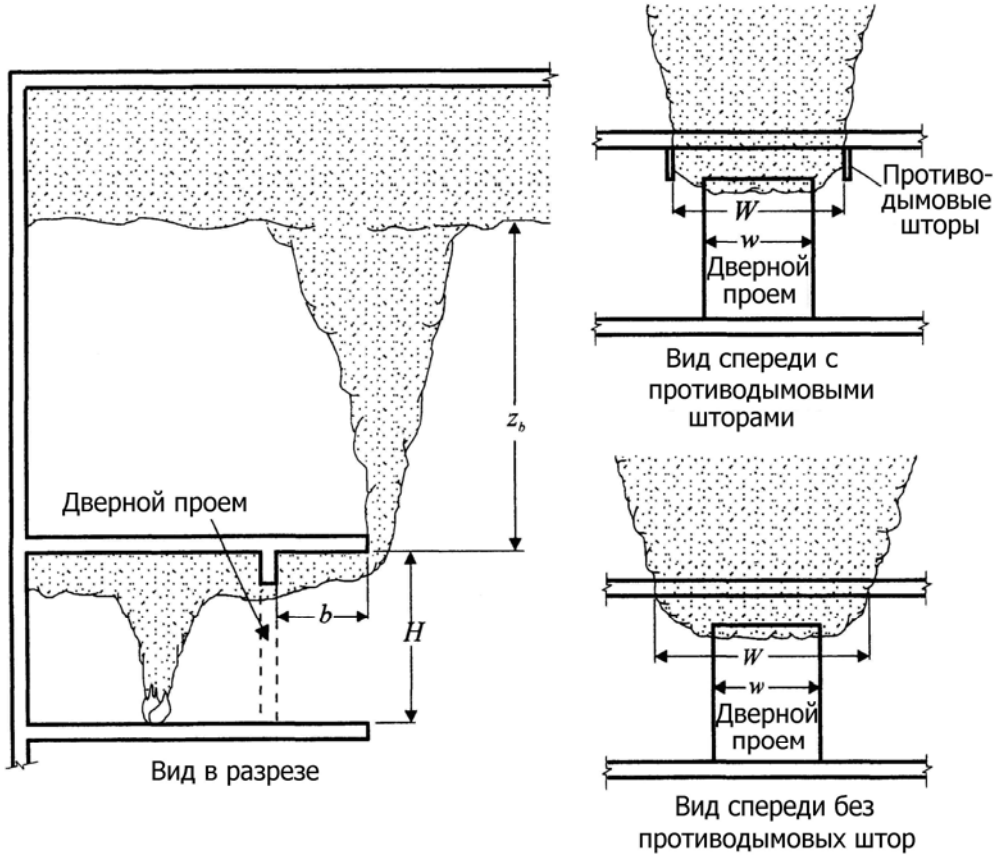


Рис. 13.8 Растекающаяся балконная струя

Уравнения (13.17) и (13.18) применяются только когда высота проёма горящего помещения значительно ниже уровня потолка, т.ч. движущая сила припотолочной струи в помещении с пожаром не влияет напрямую

на поток, выходящий из проёма. Толщина припотолочной струи составляет 10%-20% высоты от основания пожара до потолка. Основываясь на этом, можно утверждать, что движущая сила припотолочной струи не является дополнительным фактором воздействия, когда высота проёма не превышает 80% расстояния от основания пожара до потолка.

Для растекающихся струй, не согласующихся с условиями уравнения (13.18), может быть использовано масштабное моделирование, моделирование на основе вычислительной гидродинамики или другие корреляции.

Уравнение (13.17) широко используется при проектном анализе, но существуют противоречивые мнения относительно степени его применения. Технический комитет 5.6 Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) планирует научно-исследовательский проект, состоящий из широкомасштабных экспериментов с пожарами с целью проверки применимости уравнения (13.17) и получения информации по некоторым растекающимся струям, не согласующимся с условиями уравнения (13.18).

Пример 13.3 Струя, проникающая с балкона

Каков массовый расход растекающейся балконной струи для параметров, перечисленных ниже?

Скорость выделения тепла, $\dot{Q}$ = 528 кВт

Высота над балконом, z_b = 6,10 м

Высота балкона над поверхностью топлива, H = 3,05 м

Ширина проёма горящего помещения, w = 1,83 м

Расстояние от проёма до края балкона, b = 3,66 м

Согласно уравнению (13.18), ширина струи, растекающейся под балконом, приблизительно равна:

$$W = w+b = 1,83+3,66 = 5,49 \text{ м.}$$

Согласно уравнению (13.17), массовый расход растекающейся струи равен:

$$\dot{m} = 0,36\,(\dot{Q}W^2)^{1/3}(z_b + 0,25H) = 0,36\left[(528)(5,49)^2\right]^{1/3}\left[6,10 + 0,25(3,05)\right] = 62,1 кг/с.$$

Оконные струи

Оконная струя – это струя, вытекающая через проём, например, оконный или дверной проём помещения, полностью охваченного пожаром (рис. 13.9).

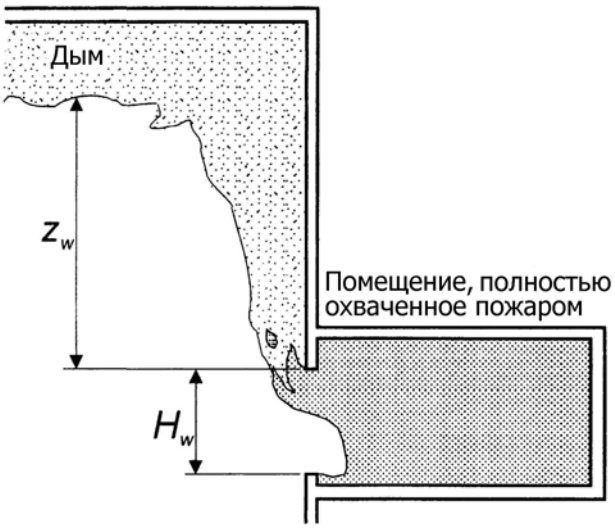


Рис. 13.9 Струя из окна

Как описано в главе 2, пожар, полностью охвативший помещение – это пожар, при котором горят все горючие материалы, находящиеся в помещении. Высокая мощность такого пожара объясняет тот факт, что оконные струи обычно не рассматривают как расчётные пожары в зданиях с системой спринклеров. При таком пожаре топливо, улетучивающееся в помещении, будет гореть снаружи проёма. Скорость выделения тепла при сильном пожаре ограничена воздухом для горения, достигающим пожара. Такой пожар называют пожаром, регулируемым вентиляцией. Соответственно, мощность пожара зависит от размеров и формы проёма помещения и горящих материалов. Основываясь на экспериментальных данных по пожарам для дерева и полиуретана в помещении с одним прямоугольным проёмом, средняя скорость выделения тепла равна:

$$\dot{Q} = 1260 A_w H_w^{1/2} \qquad (13.19)$$

где

$\dot{Q}$ = скорость выделения тепла при пожаре, кВт;

A_w = площадь вентиляционного отверстия, м^2;

H_w = высота вентиляционного отверстия, м.

Уравнения для осесимметричной струи или пристенных и угловых струй могут быть адаптированы для оконной струи. Это достигается путём определения коэффициента подсоса воздуха на конце пламени, вырывающегося из проёма, и определения высоты в уравнении осесимметричной струи, которая даёт такой же подсос воздуха к струе. Член уравнения осесимметричной струи «высота» необходимо скорректировать следующим коэффициентом:

$$a = 2{,}40 A_w^{2/5} H_w^{1/5} - 2{,}1 H_w \tag{13.20}$$

Подстановка этого коэффициента в уравнение (13.10) даёт уравнение для осесимметричных струй:

$$\dot{m} = 0{,}071 \dot{Q} c^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 0{,}0018 \dot{Q}_c \tag{13.21}$$

Подстановка этого же коэффициента в уравнение (13.16) даёт общее уравнение, которое учитывает наличие стен:

$$\dot{m} = \frac{1}{n}\left[0{,}071 n^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 0{,}0018\, n \dot{Q}_c\right] \tag{13.22}$$

где z_w – высота над верхом окна. Подставив уравнения (13.19) и (13.20) в уравнение (13.22), получим:

$$\dot{m} = \frac{1}{n}\left[0{,}68 (n A_w H_w^{1/2})^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 1{,}59 n A_w H_w^{1/2}\right] \tag{13.23}$$

Уравнения (13.22) и (13.23) применимы к пристенным и угловым струям, и при n = 1, эти уравнения становятся такими же, что и уравнения для оконной струи. Стоит отметить, что уравнение (13.23) не содержит член «скорость выделения тепла», и это может происходить из-за того, что пожар регулируется вентиляцией, и скорость выделения тепла зависит от вентиляционного отверстия. Данный расчёт оконных струй основан на допущениях, касающихся подсоса воздуха к струе и применимости общей модели пристенной струи, но он не был проверен экспериментально.

Средняя температура струи

Среднюю температуру струи можно рассчитать, анализируя струю на основе первого закона термодинамики. Рассмотрим струю как устойчивый поток с контрольным объёмом, показанным на рис.13.10. Не учитывая небольшое количество массы, добавленной в поток струи при сгорании, первый закон для струи выглядит так:

$$\dot{Q}_g + \dot{Q}_t = \dot{m}(h_e - h_i + \Delta KE + \Delta PE) + \dot{W} \tag{13.24}$$

где

$\dot{Q}_g$ = теплота, выделяющаяся внутри контрольного объёма, кВт;

$\dot{Q}_t$ = теплота, передаваемая из окружающей среды в контрольный объём, кВт;

$\dot{m}$ = массовый расход, кг/с;

h_i = энтальпия потока, входящего в контрольный объём, кВт/кг;

h_e = энтальпия потока, выходящего из контрольного объёма, кВт/кг:

ΔKE = изменение в кинетической энергии, кВт/кг;

ΔPE = изменение в потенциальной энергии, кВт/кг;

$\dot{W}$ = работа, совершённая системой над внешними телами, кВт.

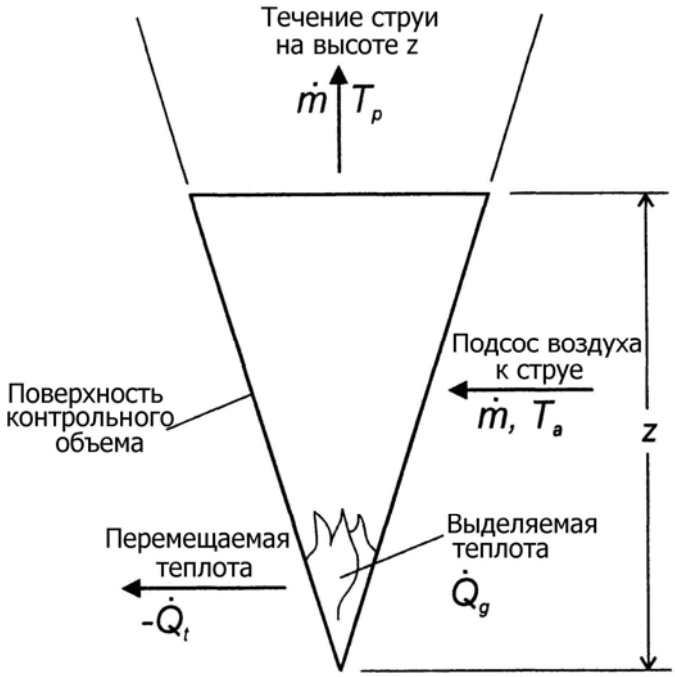


Рис. 13.10 Контрольный объем для теоретической модели струи

При устойчивой струе работа равна нулю, и изменения в кинетической и потенциальной энергии незначительны. Выделяемая теплота – это теплоотдача пожара ($\dot{Q}_g = \dot{Q}$). Теплота передается от струи окружающей среде посредством проводимости и излучения ($\dot{Q}_t = -\dot{Q}_r$, где $\dot{Q}_r$ – излучаемая теплота), т.ч. ($\dot{Q}_c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_t$). Удельная теплоёмкость может считаться постоянной ($h = C_pT$). Первый закон ведет к уравнению для температуры струи.

$$T_p = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}C_p} \tag{13.25}$$

где

T_p = средняя температура струи на высоте z, °C;

T_0 = температура окружающей среды, °C;

C_p = удельная теплоёмкость газов струи, кДж/кг °C.

Струи пожара состоят в основном из воздуха, смешанного с продуктами горения, и за удельную теплоёмкость газов струи обычно принимается удельная теплоёмкость воздуха [C_p = 1,00 кДж/кг°C)].

Пример 13.4 Средняя температура струи

Какова средняя температура струи в примере 13.1?

Согласно уравнению (13.25), средняя температура струи равна:

$$T_p = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}C_p} = 22 + \frac{2950}{582(1{,}00)} = 73^{\circ}C$$

Как предполагается, средняя температура струи меньше температуры струи по осевой линии.

Максимальная высота струи

Уравнения массового расхода струи были разработаны для струй большой плавучести. Когда дым недостаточно горяч, чтобы подняться, он застаивается, или его уносят существующие воздушные потоки. Объединение уравнений (13.10) и (13.25) дает следующее выражение максимальной высоты струи, на которой струя может считаться значительно плавучей.

$$Z_{\max} = \left[\dot{Q}_c^{\,2/3} \left(\frac{14}{\Delta T_{\min}} - 0{,}0254 \right) \right]^{3/5} \qquad (13.26)$$

где

$z_{\max}$ = максимальная высота, на которой струя считается плавучей, м;

$\dot{Q}_c$ = конвективная теплоотдача, кВт;

$\Delta T_{\min}$ = минимальное увеличение температуры струи над температурой окружающей среды, °С.

Уравнение (13.26) применяется для осесимметричных струй. Минимальное увеличение температуры – это наименьшее увеличение температуры, при котором струя обладает достаточной плавучестью, чтобы перерасти в струю сильной плавучести.

Исследования по определению значения минимального увеличения температуры, соответствующего различным применениям и скоростям воздушных потоков, не проводились. Пока не появится более точная информация, предлагается использовать значение 2°С. Рис.13.11 показывает максимальную высоту струи для этого минимального увеличения температур.

При суммарной скорости выделения тепла 530 кВт, максимальная высота струи на рис.13.11 равна примерно 40 м. При суммарной скорости выделения тепла 2100 кВт максимальная высота струи составляет приблизительно 67 м. К большинству проектов максимальная высота струи не имеет отношения, но ее необходимо учитывать для атриумов с высокими потолками.

Рис. 13.11 Максимальная высота струи

Объёмный расход

Объёмный расход струи равен

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_p} \qquad (13.27)$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход в струе на высоте *z, кг*/с;

$\dot{V}$ = объёмный расход дыма на высоте *z,* м^3/с:

ρ_p = плотность газов струи на высоте *z*, кг/м^3.

Плотность воздуха и струи

Плотность воздуха и газов струи рассчитывается по закону идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{RT} \qquad (13.28)$$

где

ρ = плотность воздуха или газов струи, кг/м^3;

p = абсолютное давление, Па;

R = газовая константа, Дж/кг К;

T = абсолютная температура, К.

За абсолютное давление обычно принимают стандартное атмосферное давление в 101325Па, а за газовую константу – константу воздуха, соответствующую 287 Дж/кг К.

В большинстве мест при расчёте плотности воздуха и дыма атмосферное давление можно считать постоянным. Это означает, что *ρ/R* можно считать константой и с учётом этого рассчитать плотность.

$$\rho = p_r \frac{T_r}{T} \tag{13.29}$$

где

ρ_r = исходная плотность, кг/м^3;

T_r = абсолютная исходная температура, К.

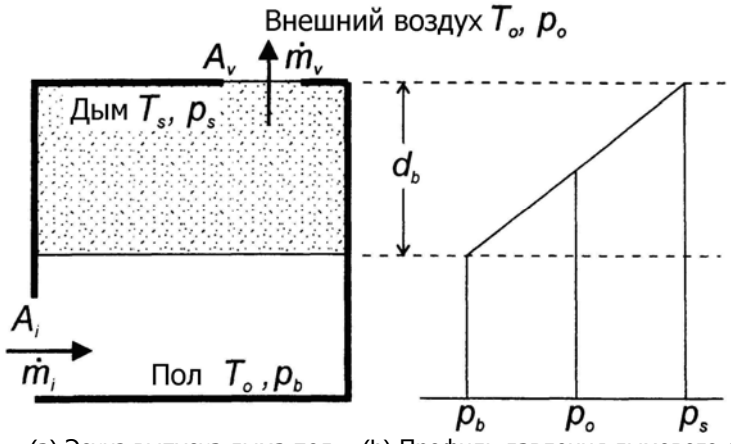
Существует бесконечное количество возможных пар ρ_r - T_r, и одна из тех, что можно использовать для подобных расчётов - ρ_r = 1,20 кг/м^3, T_r = 294 К.

Замкнутый поток

Как уже отмечалось ранее, диаметр струи увеличивается с высотой. В высоком узком атриуме струя может касаться всех стен атриума, прежде чем достигнет потолка. Там, где струя касается стены, подсоса воздуха к струе не происходит. В целях управления дымоудалением, границей дымового слоя следует считать высоту, на которой дым соприкасается со всеми или с большинством стен атриума.

Естественная вентиляция

Вентиляционные отверстия естественной вентиляции представляют собой проёмы в потолке, через которые дым вытекает благодаря своей плавучести. Слой горячего дыма под потолком вытесняет дым через вентиляционное отверстие и затягивает кондиционированный воздух через другие отверстия в атриум. Приводимый ниже расчёт естественной вентиляции адаптирован на основе расчёта, проведённого Томасом и др. (Thomas et al., 1963 [17]), и проиллюстрирован на рис.13.12. Температура в атриуме под дымовым слоем считается такой же, что и температура снаружи.



(a) Эскиз выпуска дыма под действием силы тяжести (b) Профиль давления дымового слоя

Рис. 13.12 Выпуск дыма под действием силы тяжести

Масса протекает через вентиляционное отверстие и во входном отверстии может быть выражена уравнением потока воздуха через отверстие:

$$\dot{m}_v = C_v A_v \sqrt{2\rho_s (p_s - p_0)} \tag{13.30}$$

и

$$\dot{m}_i = C_i A_i \sqrt{2\rho_0 (p_0 - p_b)} \tag{13.31}$$

где

$\dot{m}_v$ = массовый расход через вентиляционное отверстие, кг/с;

$\dot{m}_i$ = массовый расход через входное отверстие, кг/с;

C_v = коэффициент расхода вентиляционного отверстия (в относительных единицах);

C_i = коэффициент расхода входного отверстия (в относительных единицах);

A_v = площадь вентиляционного отверстия, м^2;

A_i = площадь входного отверстия, м^2;

ρ_s = плотность дыма, кг/м^3;

ρ_0 = плотность наружного воздуха, кг/м^3;

p_s = давление дымового слоя у потолка, Па;

p_0 = наружное давление, Па;

p_b = давление воздуха под дымовым слоем, Па.

Разность давлений плавучести дымового слоя равна

$$p_s - p_b = g d_b (\rho_0 - \rho_s) \tag{13.32}$$

где

g = ускорение силы тяжести, м/с^2;

d_b = глубина дымового слоя под вентиляционным отверстием, м.

Коэффициенты расхода считаются равными ($C = C_v = C_i$). Массовый расход на выходе вентиляционного отверстия равен массовому расходу через входное отверстие ($m_v = m_i$). Плотность дыма можно выразить уравнением:

$$\rho_s = \rho_0 \frac{T_0}{T_s} \tag{13.33}$$

Объединив уравнения с (13.30) по (13.33), получим:

$$\dot{m}_v = \frac{C A_v \rho_0 \left[2 g d_b (T_s - T_0)(T_0 / T_s)\right]^{1/2}}{\left[T_s + (A_v / A_i)^2 T_0\right]^{1/2}} \tag{13.34}$$

где

$\dot{m}_v$ = массовый расход через вентиляционное отверстие, кг/с;

C = коэффициент расхода (в относительных единицах);

A_v = площадь вентиляционного отверстия, м^2;

A_i = площадь входного отверстия, м^2;

ρ_0 = плотность наружного воздуха, кг/м^3;

g = ускорение силы тяжести, 9,80 м/с^2;

d_b = глубина дымового слоя под вентиляционным отверстием, м;

T_0 = абсолютная температура наружного воздуха, K;

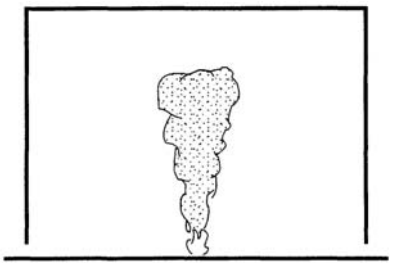
T_s = абсолютная температура дыма, K;

Временно́е отставание

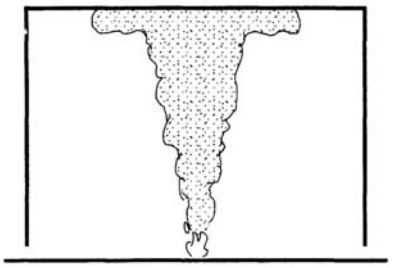
Струе требуется время, чтобы подняться к потолку, и припотолочной струе требуется время для образования дымового слоя под потолком (Рис.13.13). Согласно теоретической зонной модели пожаров, (1) дым от струи достигает верхнего слоя в момент сгорания и (2) сплошной дымовой слой образуется уже в тот момент, когда любой дым достигает потолка.

Программы зонного моделирования пожаров были разработаны для таких помещений, как обычные спальни, столовые и комнаты отдыха. В этих помещениях ошибки, возникающие в результате подобных упрощений, были незначительными. Атриумы же представляют собой помещения бóльших размеров, и в последующих разделах пойдёт речь о средствах оценки ошибок, возникающих при игнорировании временно́го отставания.

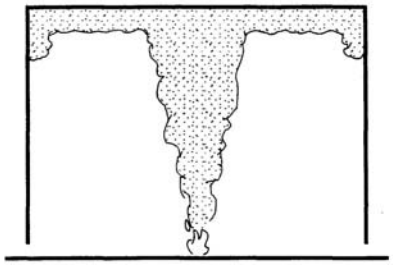
Игнорирование этого отставания приводит к неправильной оценке времени, требующегося на заполнение атриума дымом и активацию пожарных детекторов. При расчёте заполнения атриумов дымом это некритично, т.к. у пользователей атриума будет больше времени прежде, чем дым достигнет определённого уровня. При расчёте работы детекторов дыма, игнорирование этого отставания во времени приводит к преуменьшению времени, требуемого для срабатывания детекторов, что критично, поскольку у людей остаётся меньше времени для спасения, чем было спрогнозировано.



(a) Растущая основная струя



(b) Полностью сформировавшаяся основная струя
и растущая припотолочная струя



(c) Полностью сформировавшаяся основная струя
и припотолочная струя, заполнившая все
пространство под потолком

Рис. 13.13 Формирование основной и припотолочной струи

Время запаздывания основной струи

Ньюман и Маурер (Newman, 1988 [18] and Mowrer, 1990 [19]) разработали соотношения временно́го отставания для основных струй при стационарном и нестационарном пожарах. Поскольку огню свойственно разрастаться, временно́е отставание при стационарных пожарах, вероятно, является менее важным.

При стационарном пожаре,

$$t_{pl} = 0{,}67 \frac{H^{4/3}}{\dot{Q}^{1/3}} \tag{13.35}$$

При квадратичном пожаре,

$$t_{pl} = 0{,}1 H^{4/5} t_g^{\ 2/5} \tag{13.36}$$

где

t_{pl} = временно́е отставание основной струи, с;

t_g = время роста, с;

H = высота потолка над поверхностью топлива, м;

$\dot{Q}$ = скорость выделения тепла, кВт.

В целом, при квадратичных пожарах временно́е отставание основной струи больше, чем при стационарных пожарах, что видно на рис.13.14. Это ожидаемо, поскольку квадратичные пожары и начинаются со скорости выделения тепла равной нулю и разрастаются пропорционально квадрату времени, в то время как стационарные пожары начинаются сразу с полного пожара, что во многом напоминает газовую горелку.

При медленном квадратичном пожаре с высотой потолка 30 м над поверхностью топлива, время запаздывания струи составляет всего около 18 секунд. Такое небольшое значение подтверждает разумность игнорирования временно́го отставания основной струи.

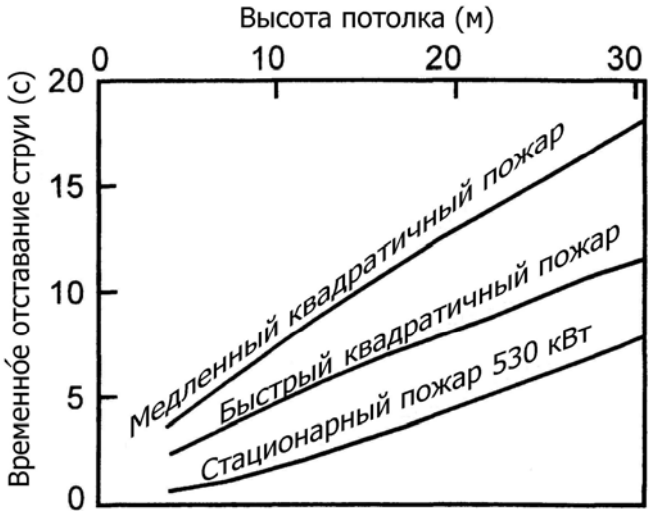


Рис. 13.14 Временно́е отставание при развитии основной струи

Время запаздывания припотолочной струи

Ньюман и Маурер также разработали следующие соотношения для временно́го отставания припотолочных струй при стационарных и нестационарных пожарах.

При стационарном пожаре,

$$t_{cj} = \frac{0{,}833 r^{11/6}}{\dot{Q}^{1/3} H^{1/2}} \tag{13.37}$$

При квадратичном пожаре,

$$t_{cj} = \frac{0{,}72 r t_g^{\,2/5}}{H^{1/5}} \tag{13.38}$$

где

t_{cj} = временно́е отставание при развитии припотолочной струи, с;

r = радиус или расстояние по горизонтали от осевой линии струи, м.

Как и в случае со временем запаздывания основной струи, квадратичные пожары характеризуются наибольшим временем запаздывания припотолочной струи, как показано на рис.13.15. Припотолочная струя быстрого квадратичного пожара при высоте H = 6 м в течение около 25 секунд распространяется в радиусе 7,6 м.

Рис. 13.15 Временно́е отставание струи при развитии припотолочной струи

Общее время запаздывания

Общее время запаздывания есть сумма времени запаздывания основной и припотолочной струй:

$$t_t = t_{pl} + t_{cj} \tag{13.39}$$

где t_t - общее время запаздывания при развитии струй, с.

«Эффект прокалывания»

Эффект прокалывания – подсасывание воздуха в вытяжную противодымную вентиляцию из незадымлённого слоя ниже уровня дыма. Когда глубина дымового слоя под вытяжным отверстием относительно небольшая, высокая скорость дымоудаления может привести к вовлечению холодного воздуха из незадымлённого слоя (рис 13.16). Это явление называется *«эффектом прокалывания».*

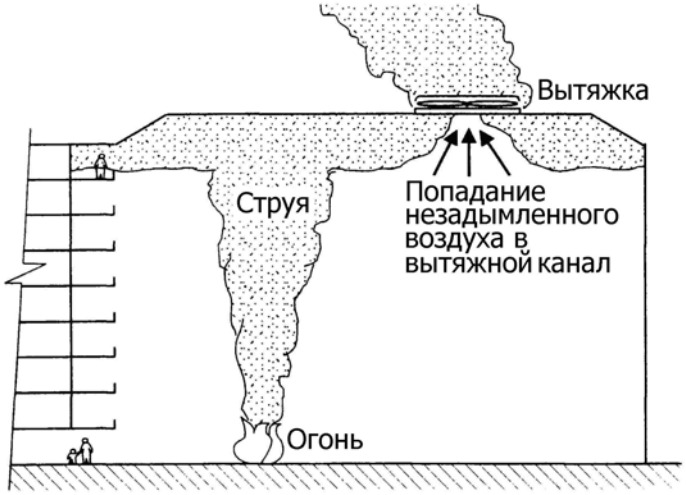


Рис. 13.16 Попадание незадымленного воздуха в вытяжной канал может привести к сбоям в работе вытяжной противодымной вентиляции

Количество вытяжных отверстий

Чтобы предотвратить «эффект прокалывания», может потребоваться не одно вытяжное отверстие. Максимальный массовый расход, который можно эффективно рассчитать, используя одно вытяжное отверстие, равен:

$$m_{\max} = 3{,}13\beta d^{5/2}\left(\frac{T_s - T_0}{T_s}\right)^{1/2}\left(\frac{T_0}{T_s}\right)^{1/2} \tag{13.40}$$

где

$m_{\max}$ = максимальный массовый коэффициент при вытяжке без «эффекта прокалывания», кг/с;

T_s = абсолютная температура дымового слоя, K;

T_0 = абсолютная температура окружающей среды, K;

d = глубина дымового слоя под основанием вытяжного отверстия, м;

β = коэффициент расположения вытяжки (в относительных единицах).

Когда речь идёт об «эффекте прокалывания», глубина дымового слоя всегда есть расстояние от границы дыма до основания вытяжного отверстия. Для вытяжного отверстия, расположенного в стене, глубина дымового слоя под основанием вытяжного отверстия изображена на рис.13.17.

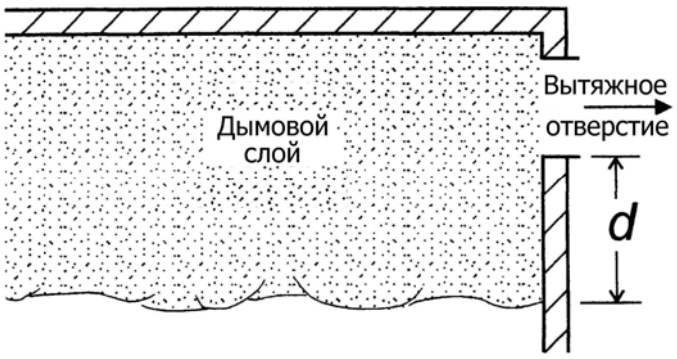
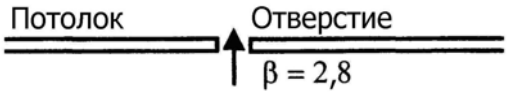
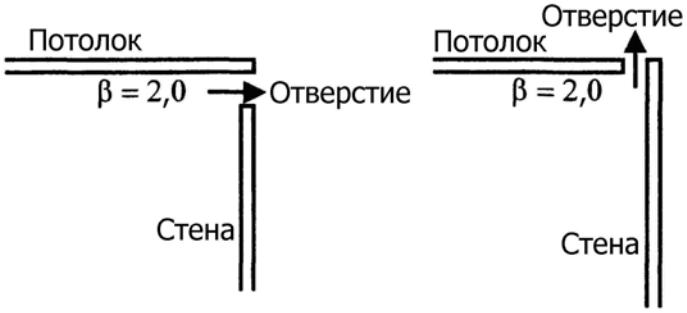


Рис. 13.17 Глубина, d, дымового слоя ниже основания вытяжного отверстия

Основываясь на недостаточной информации, предлагаемые значения для β: 2,0 – для вытяжного отверстия на потолке у стены, 2,0 – для вытяжного отверстия на стене у потолка, и 2,8 – для вытяжного отверстия на потолке вдали от стен (рис.13.18). Предлагается, чтобы значение *d/D* было больше 2, где *D* – диаметр отверстия. Для вытяжных отверстий используйте *D = 2ab/(a + b),* где *a* и *b* – длина и ширина отверстия. Результаты экспериментов, проведённых Национальным Канадским научно-исследовательским советом (National Research Council of Canada), согласуются с данным подходом к «эффекту прокалывания». (Lougheed and Hadjisophocleous, 1997, 2000 [20, 21]; Lougheed et al., 1999 [22]; Hadjisophocleous et al., 1999 [23]).



(a) Отверстие в потолке вдали от стен



(b) Отверстие в стене у потолка (c) Отверстие в потолке у стены

Рис. 13.18 Значения коэффициента расположения вытяжки, β

Уравнение (13.40) может быть выражено на основе коэффициента объёмного расхода:

$$\dot{V}_{\max} = 0{,}00887\beta d^{5/2}\sqrt{T_0\left(T_s - T_0\right)} \tag{13.41}$$

где

$\dot{V}_{\max}$ = максимальный объёмный расход при T_s, м^3/с.

Принимая во внимание то, что значения расходов для каждого вытяжного отверстия равны, количество вытяжных отверстий, N_{inlets}, рассчитывается следующим образом:

$$N_{inlets} = ROUND\left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\max}}\right) \tag{13.42}$$

где функция ROUND указывает на то, что значение в скобках округляется до ближайшего целого числа.

Расстояние между вытяжными отверстиями

Когда выпуск на вытяжном отверстии близок к максимальному коэффициенту расхода, необходимо соблюдать соответствующее расстояние между вытяжными отверстиями для сведения к минимуму взаимодействия потоков около отверстий. Один из критериев для интервала между отверстиями заключается в том, что данный интервал должен быть, по меньшей мере, равен расстоянию от единственного отверстия, что приведёт к произвольно малой скорости, основанной на стоке. При произвольной скорости в 12 м в минуту, минимальный интервал для отверстий, расположенных в стене около потолка (или в потолке около стены) равен:

$$S_{\min} = 0{,}32\beta\sqrt{\dot{V}_e} \tag{13.43}$$

где

$S_{\min}$ = минимальный интервал между отверстиями, м;

$\dot{V}_e$ = объёмный расход, м^3/с;

β = коэффициент расположения вытяжки (в относительных единицах).

Минимальная глубина для предотвращения «эффекта прокалывания»

В подходе, описанном в предыдущем разделе, рассматривалось количество вытяжных отверстий, необходимых для предотвращения «эффекта прокалывания», но данный вопрос можно также рассматривать с точки

зрения глубины дымового слоя, необходимого для предотвращения «эффекта прокалывания» при конкретной скорости дымоудаления.

Минимальная глубина дымового слоя для предотвращения «эффекта прокалывания» может быть выражена уравнением:

$$d_m = \frac{\dot{V}_e^{2/5}}{0{,}15\beta^{2/5}\left[T_0\left(T_s - T_0\right)\right]^{1/5}} \tag{13.44}$$

где d_m = минимальная глубина дымового слоя для предотвращения «эффекта прокалывания», м.

Удовлетворение уравнения (13.44) равнозначно удовлетворению критерия для количества вытяжных отверстий, описанного в предыдущем разделе. Это означает, что соответствия одному из этих критериев уже достаточно, чтобы обеспечить соответствие второму критерию.

Расход при «эффекте прокалывания»

Условия вытяжки отработанного воздуха и дыма показаны на рис.13.19. Массовый расход отработанного воздуха есть сумма удаляемого дыма и воздуха. Выпуск из вытяжного отверстия может быть выражен как:

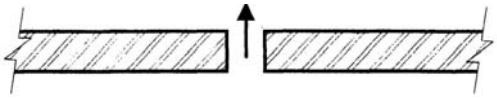
$$\dot{m}_e = \dot{m}_{eo} + \dot{m}_{es} \tag{13.45}$$

где

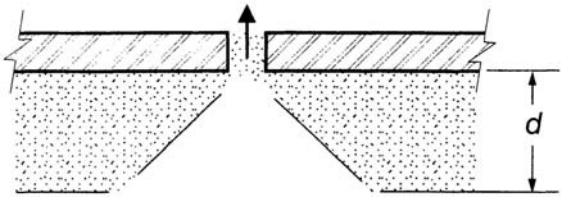
$\dot{m}_e$ = суммарный выпуск из отверстия, кг/с;

$\dot{m}_{eo}$ = воздух из нижнего слоя, выпускаемый из отверстия, кг/с;

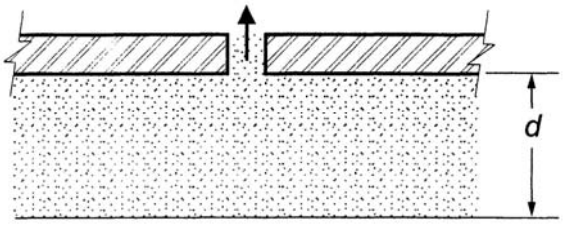
$\dot{m}_{es}$ = дым, выпускаемый из отверстия, кг/с.



(a) Вытяжка воздуха при отсутствии дымового слоя



(b) Вытяжка воздуха с дымом, когда глубина дымового слоя, *d*, меньше минимальной глубины, d_m, необходимой для предотвращения «эффекта прокалывания»



(c) Вытяжка одного только дыма, когда глубина дымового слоя, *d*, больше минимальной глубины, d_m, необходимой для предотвращения «эффекта прокалывания»

Рис. 13.19 Условия вытяжки дыма и отработанного воздуха

Когда глубина дымового слоя равна минимальной глубине дымового слоя, необходимой для предотвращения «эффекта прокалывания», или превышает её *($d \geq d_m$),* массовые расходы соответствуют $\dot{m}_{eo} = 0$ и $\dot{m}_{es} = \rho_s \dot{V}_e$ где $\dot{V}_e$ - суммарный объёмный выпуск, м^3/с и ρ_s - плотность дыма, кг/м^3. Когда глубина дымового слоя равна нулю *(d =* 0), массовые расходы равны $\dot{m}_{eo} = \rho_o \dot{V}_e$ и $\dot{m}_{es} = 0$ m_{es}, где ρ_o - плотность наружного или более низкого слоя воздуха, кг/м^3.

Поскольку не существует официально разработанной и экспериментально подтверждённой теории расхода при «эффекте прокалывания», предлагаем использовать следующие соотношения:

$$\dot{m}_{es} = \rho_s \dot{V}_e \left(\frac{d}{d_m} \right)^a \quad \text{для } 0 \le d < d_m \tag{13.46}$$

или

$$\dot{m}_{es} = \rho_s \dot{V}_e \quad \text{для} \quad d_m \le d$$

и

$$\dot{m}_{eo} = \rho_o \dot{V}_e \left[1 - \left(\frac{d_m - d}{d_m} \right)^\alpha \right] \text{для } 0 \le d < d_m \tag{13.47}$$

или

$$\dot{m}_{eo} = 0 \quad \text{для} \quad d_m \le d$$

где α - экспонента «эффекта прокалывания». Влияние этой экспоненты на высоту дымового слоя показано на рис.13.20. Наибольшие показатели приводят к прогнозированию меньших дымовых слоёв.

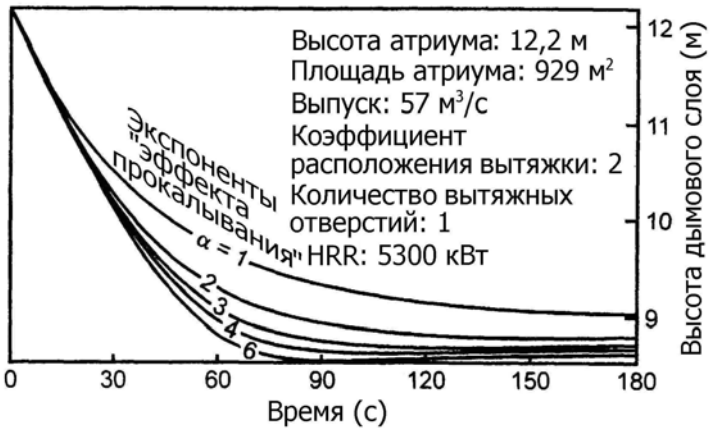
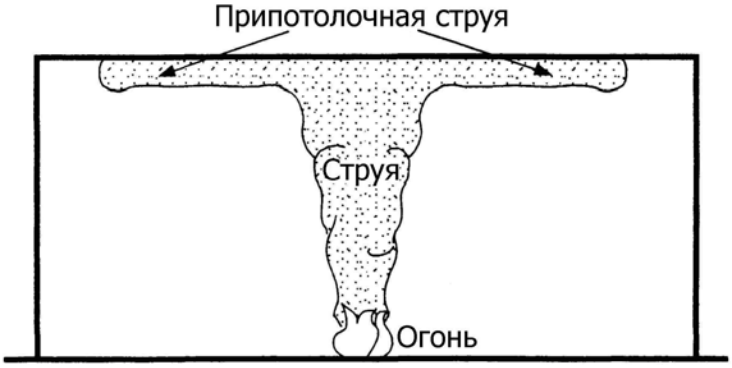


Рис. 13.20 Влияние экспоненты «эффекта прокалывания» на высоту дымового слоя согласно модели AZONE

Минимальная глубина дымового слоя

В предыдущем разделе шла речь о глубине дымового слоя, необходимой для предотвращения «эффекта прокалывания». В этом разделе речь пойдёт о минимальной глубине расчётного дымового слоя, необходимой для того, чтобы вместить реальный поток дыма под потолком. Предупреждаем читателей о разнице в определениях глубины дымового слоя. Для прикладных программ по расчёту «эффекта прокалывания», глубина дымового слоя – это расстояние от границы дымового слоя до основания вытяжного отверстия. В данном разделе, глубина дымового слоя – это расстояние от границы дымового слоя до потолка.

Когда струя дыма достигает плоской поверхности потолка, дым меняет направление и образует припотолочную струю, растекающуюся радиально от того места, где основная струя соприкасается с потолком. Как было описано выше, глубина припотолочной струи лежит в пределах 10% - 20% расстояния от основания топлива до потолка. Это значительное упрощение в том плане, что припотолочная струя составляет около 10% расстояния, поскольку, коснувшись стен, струя начинает обратное движение и протекает под собой. Если речь идёт о закрытом помещении или атриуме, где около потолка нет проёмов, дымовой слой образуется так, как показано на рис.13.21. Для такого закрытого помещения или атриума, рекомендуется принимать за расчётную глубину дымового слоя величину не менее 20% расстояния от основания огня до потолка.



(а) Образование припотолочной струи

(b) Припотолочная струя, достигшая стены и повернувшая назад

(c) Образование дымового слоя минимальной глубины в замкнутом помещении

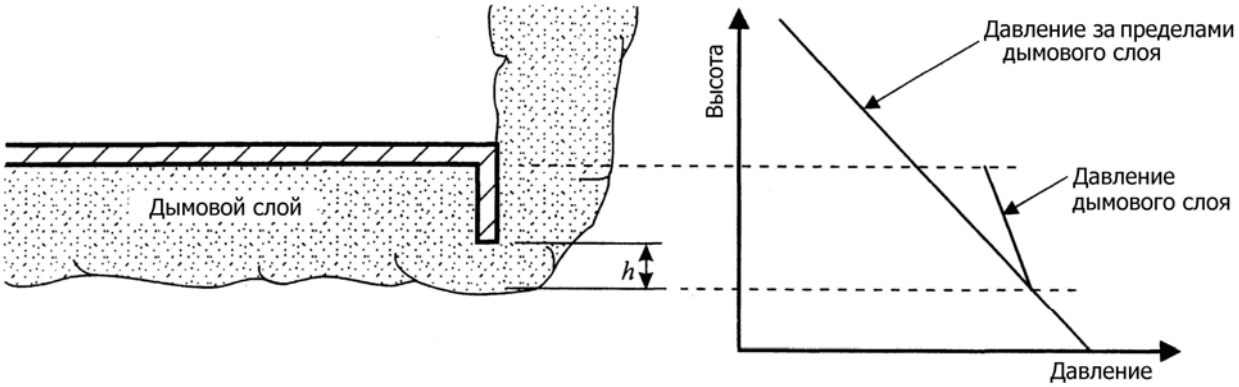
Рис. 13.21 Образование минимального дымового слоя в закрытом помещении или атриумах

В помещениях и атриумах с проёмами в потолке, дым припотолочной струи протекает через проём (рис. 13.22). При условии, что проём достаточно широкий, минимальная глубина дымового слоя составляет около 10% расстояния от основания огня до потолка.

Рис. 13.22 Дымовой слой в помещении или атриумах, где есть проем в потолке

Горизонтальный поток дыма

Горизонтальный поток, вытекающий из дымового слоя, и соответствующие показатели давления отражены на рис.13.23. Эти показатели давления гидростатические, т.е. компоненты динамического давления незначительно малы. Проём считается достаточно большим – настолько, что давление под дымовым слоем может считаться равным давлению снаружи проёма. Кроме того, верхняя часть проёма находится значительно ниже потолка, т.ч. движущая сила припотолочной струи не влияет на истечение дыма через проём.



(a) Эскиз горизонтального потока (b) Профили давления

Рис. 13.23 Горизонтальный поток через проем или вентиляционное отверстие

Поток дыма, проходящий через проём зависит от плавучести дыма и толщины дымового слоя под первым уровнем.

$$\dot{m} = \frac{2}{3} C W h^{3/2} \sqrt{2 \rho_s g (\rho_a - \rho_s)} \tag{13.48}$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход из дымового слоя через проём, кг/с;

W = ширина проёма, м;

h = глубина дымового слоя, м;

g = ускорение силы тяжести [приблизительно 9,8 м/с^2];

ρ_a = плотность окружающего воздуха, кг/м^3;

ρ_s = плотность дыма, кг/м^3;

C = коэффициент расхода (в относительных единицах – приблизительно 0,7).

Уравнение (13.48) может также быть записано следующим образом:

$$\dot{m} = 2{,}07 W h^{3/2} \sqrt{\rho_s (\rho_a - \rho_s)} \tag{13.49}$$

Подставив уравнение идеального газа в уравнение (13.49) и переставив члены уравнения, получаем:

$$\dot{m} = 730 W h^{3/2} \frac{1}{T_s} \sqrt{\frac{T_s}{T_o} - 1} \tag{13.50}$$

где

T_s = температура дыма, K;

T_o = температура окружающей среды, K.

Как было сказано выше, этот расчёт применяется, когда (1) проём считается достаточно большим, что давление ниже дымового слоя может считаться равным давлению снаружи проёма, и (2) движущая сила припотолочной струи не влияет на течение дыма через проём. Комментарии, касающиеся движущей силы припотолочной струи, приведённые выше в разделе о растекающихся балконных струях, также применимы и здесь. Когда эти условия отсутствуют, горизонтальное течение дыма можно анализировать посредством физического моделирования или вычислительной гидродинамики.

Приведённый выше расчёт – это сокращённый вариант подхода, используемого моделями многозонных пожаров. Многозонные модели учитывают возможность протекания дыма в помещение, где имеется дымовой слой, спустившийся ниже верха проёма. Разница в давлении и расходах у проёмов между отсеками зонной модели может быть сложной.

Смежные помещения

Смежные помещения – это пространства внутри здания, имеющие открытый проход к атриуму таким образом, что дым от пожара в смежном помещении может беспрепятственно проникать в атриум. Дым от пожара в атриуме может также беспрепятственно проникать в смежное помещение. Смежные помещения могут выходить напрямую в атриум или соединяться с ним через другие открытые пространства.

Подпор воздуха при пожаре в смежном помещении

Воздушный поток может быть использован для предотвращения или сдерживания проникновения в атриум дыма, возникающего в смежном помещении (рис.13.24).

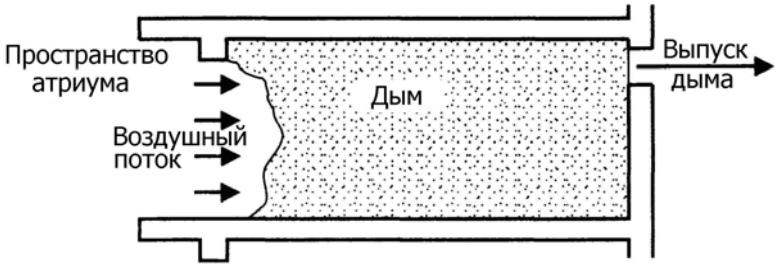


Рис. 13.24 Воздушный поток, используемый для предотвращения или сдерживания проникновения в атриум дыма, возникшего в смежном помещении

Это достигается путём выпуска дыма из смежного помещения и нагнетания воздуха в атриум так, что скорости у проёма смежного помещения достаточно для предотвращения попадания дыма в атриум. Для предотвращения такой миграции дыма, средняя скорость в проёме должна быть равна или быть больше предельной скорости потока (Heskestad, 1989 [15]).

$$v = 0{,}64\sqrt{\frac{gH(T_f - T_o)}{T_f}} \qquad (13.51)$$

где

v = предельная средняя скорость воздуха, м/с;

g = ускорение силы тяжести, м/с^2;

H = высота проёма, м;

T_f = абсолютная температура горящего пространства, K;

T_o = абсолютная температура окружающей среды, K.

Подпор воздуха при пожаре в атриуме

Воздушный поток может также быть использован для предотвращения попадания в смежное помещение дыма, возникшего в атриуме. Предельную скорость воздуха можно рассчитать по формуле:

$$v_e = 0{,}057\left(\frac{\dot{Q}}{z}\right)^{1/3} \qquad (13.52)$$

где

v_e = предельная средняя скорость воздуха, м/с;

$\dot{Q}$ = скорость выделения тепла, кВт;

z = расстояние от основания топлива до основания проёма, м.

Уравнение (13.52) неприменимо, когда z < 3 м. Более того, v_e *не* должно превышать 1 м/с. Если проём, ведущий в смежное помещение, выше границы дымового слоя, предельную скорость дыма следует рассчитывать по уравнению (13.51).

СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ В АТРИУМАХ

Известно, что способность спринклеров подавлять пожары в помещениях с потолками выше 11-15 метров ограничена. Поскольку температура дыма уменьшается по мере того, как дым поднимается вверх (благодаря вовлечению окружающего воздуха), дым может стать недостаточно горячим, чтобы активировать спринклеры, установленные под потолком атриума. Даже если спринклеры сработают, отсрочка активации может привести к разрастанию пожара до масштаба, который не поддаётся подавлению обычными спринклерами. Учитывая ограничения, связанные с делением атриумов на отсеки и с возможностями спринклеров, неудивительно, что вопрос о противодымной защите атриумов крайне важен.

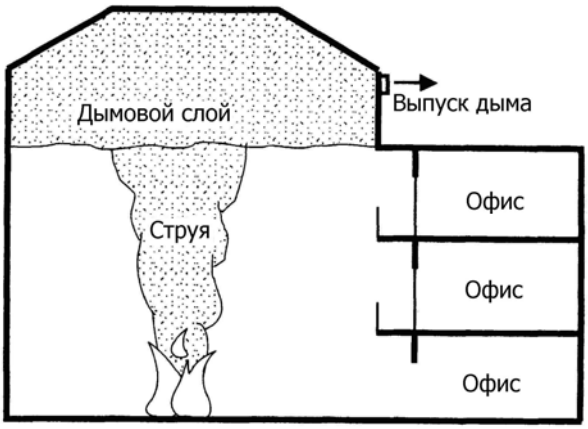
Системы

Подходы, которые могут использоваться в целях организации противодымной защиты атриумов, включают в себя: (1) задымление/заполнение дымом, (2) механическую вытяжную вентиляцию, (3) естественную вентиляцию, и (4) системы обеспечения безопасных условий. Целью большинства этих подходов, за исключением систем обеспечения безопасных условий, является защитить пользователей атриума от дыма во время эва-

куации. Целью систем обеспечения безопасных условий является защитить пользователей атриума от условий несовместимых с жизнью.

При всех этих подходах расчётный пожар может быть стационарным или нестационарным. Место возникновения пожара является важным фактором: например, пожар в пространстве атриума может образовать осесимметричную струю, в то время как пожар в смежном с атриумом пространстве может образовать растекающуюся балконную струю (рис. 14.1). В Северной Америке системы обычно проектируются для борьбы с пожарами в атриуме. В Австралии, Великобритании и других частях Европы расчётные пожары обычно сориентированы на помещения, примыкающие к атриуму, такие как магазины и офисы.

Анализ этих подходов может быть произведён с использованием уравнений или компьютерных программ зонного моделирования пожаров (например, CFAST, ASET-C и AZONE). AZONE - программа, специально созданная для расчёта движения дыма в атриуме. В конце этой главы приводится подробное описание программы AZONE.



(a) Пожар в атриуме, образующий осесимметричную струю

(b) Пожар в смежном с атриумом пространстве, образующий растекающуюся балконную струю

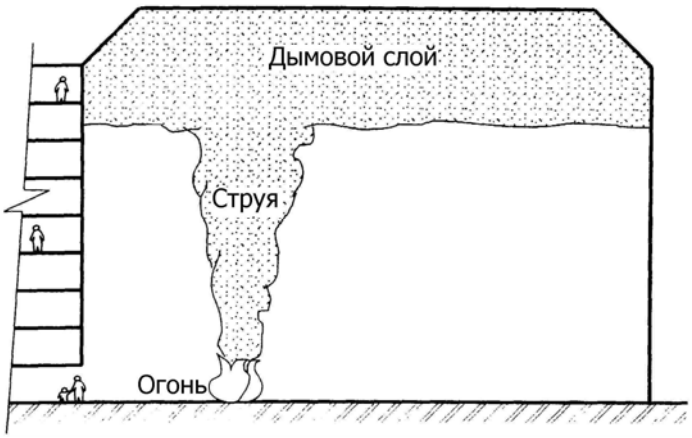
Рис. 14.1 Месторасположение пожара влияет на разновидность струи

Задымление (заполнение дымом)

Данный подход заключается в том, чтобы эвакуировать пользователей атриума или через атриум в процессе того, как пространство атриума заполняется дымом (рис.14.2). Задымление применяется только в помещениях очень большого объёма, где времени заполнения дымом достаточно для эвакуации, включая время, требуемое для того, чтобы понять, что произошёл пожар, и приготовиться двигаться к выходу. Расчёты по заполнению дымом могут выполняться с помощью компьютерных программ зонного моделирования пожаров или эмпирических уравнений, представленных ниже.

Эмпирические уравнения по заполнению атриума дымом

Эмпирические уравнения по заполнению атриума дымом основаны на испытаниях по задымлению (Heskestad and Delichatsios, 1977 [16]; Nowler, 1987 [34]; Mulholland et al., 1981 [36]; Cooper et al., 1981 [24, 37]; Hagglund et al., 1985 [35]).



Примечание:
1. Если время эвакуации меньше времени заполнения атриума дымом, подойдет система задымления атриума.
2. Время эвакуации состоит из смоделированного времени эвакуации, умноженного на эффективность проведения эвакуации, плюс задержка во времени начала эвакуации.
3. Время заполнения атриума дымом – время, за которое дымовой слой опускается до критического уровня над самым высоким этажом, занимаемым людьми.

Рис. 14.2 Заполнение атриума дымом

Из-за трудности в определении нижней границы дымового слоя на основе экспериментальных данных, в приведённых ниже корреляциях используется уникальная концепция первых признаков дыма (рис.14.3). В теоретической зонной модели границей дымового слоя считается высота, выше которой есть дым, а ниже – нет. При реальных пожарах между нижним прохладным и верхним горячим слоями образуется зона постепенного перехода. Первыми признаками дыма можно считать нижнюю границу переходной зоны. Как можно ожидать, прогнозы с использованием уравнений из данного раздела отличаются от прогнозов, сделанных с использованием программы зонного моделирования пожаров.

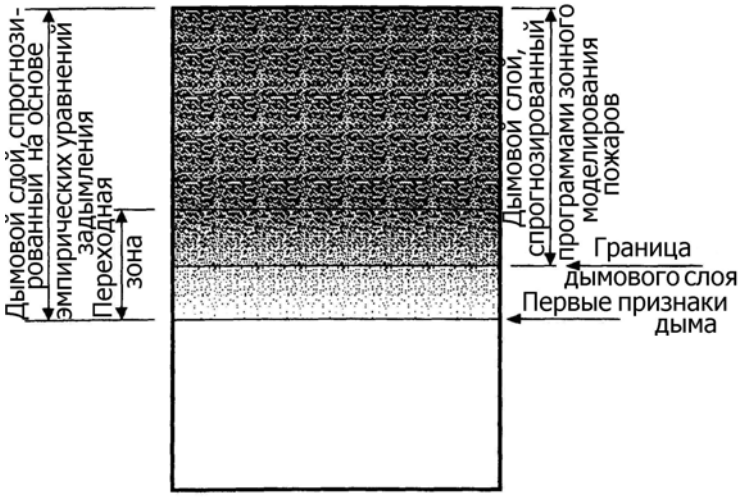


Рис. 14.3 Изображение дымовых слоев для эмпирических уравнений задымления и программ зонного моделирования пожаров

Заполнение дымом при стационарном пожаре

При стационарном пожаре заполнение дымом можно приблизительно выразить соотношением:

$$\frac{z}{H} = 1{,}11 - 0{,}28 \ln\left(\frac{t\dot{Q}^{1/3} H^{-4/3}}{\frac{A}{H^2}} \right) \qquad (14.1)$$

где

z = высота появления первых признаков дыма над поверхностью огня, м;
H = высота потолка над огнём, м;
t = время, с;
$\dot{Q}$ = скорость выделения тепла при стационарном пожаре, кВт;
A = площадь поперечного сечения атриума, м.

Уравнение (14.1) основано на струе, которая не касается стен. Поскольку соприкосновение со стеной снижает подсос воздуха, это условие завышено.

Уравнение (14.1) относится к площади постоянного поперечного сечения с учётом высоты. Для других форм атриума можно использовать программу зонного моделирования пожаров AZONE, физическое модели-

рование или вычислительную гидродинамику. Уравнение уместно, когда A/H^2 находится в пределах от 0,9 до 14, и z больше или равно 20% от H. Если $z/H>1$, это означает, что дымовой слой под потолком ещё не начал опускаться. Эти условия могут быть выражены следующим образом:

A = константа с учётом z, (14.2)

$$0{,}2 \le \frac{z}{H} \le 1{,}0\,, \tag{14.3}$$

и

$$0{,}9 \le \frac{A}{H^2} \le 14 \tag{14.4}$$

Когда с помощью уравнения (14.1) вычисляют z/H, выясняется, что z/H часто выпадает из допустимых границ. Уравнение задымления при стационарном пожаре можно применить для вычисления времени:

$$t = \frac{A}{H^2}\frac{H^{4/3}}{\dot{Q}^{1/3}}\exp\left[\frac{1}{0{,}28}\left(1{,}11 - \frac{z}{H}\right)\right] \tag{14.5}$$

На рис.14.4 показано время, спрогнозированное на основе уравнения (14.5), требуемое на заполнение дымом верхних 80% атриума (z/H = 0,2). Учитывая, что время эвакуации часто колеблется от 15 до 30 минут, из этих цифр видно, что подход «заполнение дымом» приемлем только для очень больших атриумов. Пунктирные линии на этом рисунке показывают границы применения ($0{,}09 \le A/H^2 \le 14$) уравнения задымления при стационарном пожаре.

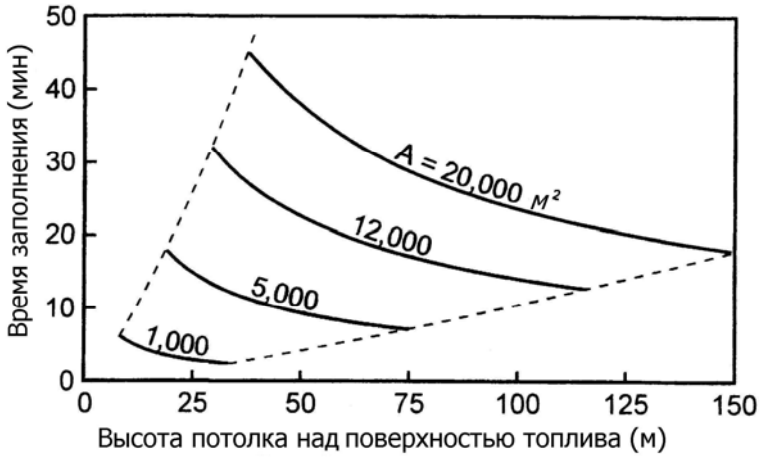


Рис. 14.4 Время, за которое при пожаре мощностью 5280 кВт дым заполняет верхние 80% атриума (z/H = 0,2) по прогнозам на основании эмпирического уравнения задымления

Пример 14.1 Заполнение дымом при стационарном пожаре

Какое время требуется при пожаре мощностью 5280 кВт для заполнения верхних 21,3 м атриума дымом, если высота атриума составляет 30,5 м, а площадь – 9290 м^2?

Высота первых признаков дыма над поверхностью пожара, z, составляет 30,5 – 21,3 = 9,2 м, и z/H = 9,2/30,5 = 0,3. Из уравнения (14.5) время заполнения дымом равняется:

$$t = \frac{A}{H^2}\frac{H^{4/3}}{\dot{Q}^{1/3}}\exp\left[\frac{1}{0{,}28}\left(1{,}11 - \frac{z}{H}\right)\right] =$$

$$= \left(\frac{9290}{(30{,}5)^2}\frac{(30{,}5)^{4/3}}{5280^{1/3}}\exp\left[\frac{1}{0{,}28}(1{,}11 - 0{,}3)\right] = 1020 \quad c\,(16{,}9\ мин)\right)$$

Заполнение дымом при нестационарном пожаре

Квадратичный пожар может быть использован в качестве аппроксимации этапа роста при развитии пожара. Для *уравнения задымления при нестационарном пожаре,* описанного ниже, пожар продолжает разрастаться в процессе заполнения дымом. Как было указано выше, на эвакуацию часто требуется от 15 до 30 минут. Пожар к концу эвакуации может быть очень большим, что ограничивает применение этого уравнения (таблица 14.1). Тем не менее, уравнение задымления при нестационарном пожаре приводится здесь для полноты картины.

$$\frac{z}{H} = 0{,}91\left[tt_g^{-2/5} H^{-4/5} \left(\frac{A}{H^2} \right)^{-3/5} \right]^{-1.45} \quad (14.6)$$

где

z = высота первых признаков дыма над поверхностью пожара, м;

H = высота потолка над огнём, м;

t = время, с;

t_g = время развития пожара, с;

A = площадь поперечного сечения атриума, м.

Как в случае с уравнением (14.1), уравнение (14.6) завышено в том, что оно определяет первые признаки дыма и рассчитано на струю, не имеющую контактов со стенами.

Уравнение (14.6) также относится и к постоянной площади поперечного сечения с учётом высоты, и замечания касательно атриумов другой формы в разделе выше также имеют отношение и к этому разделу. Уравнение уместно, когда A/H^2 находится в пределах от 1,0 до 23 и z $\geq$ 20% от H. Значение $z/H > 1$ также означает, что дымовой слой под потолком ещё не начал опускаться. Эти условия можно выразить следующим образом:

A = константа с учётом H, (14.7)

$$0{,}2 \leq \frac{z}{H} \leq 1{,}0 \quad (14.8)$$

и

$$0{,}9 \leq \frac{A}{H^2} \leq 23 \quad (14.9)$$

Время развития пожара, t_g, обсуждалось выше. Как и в случае с уравнением задымления при стационарном пожаре, с помощью уравнения задымления при стационарном пожаре можно рассчитать время:

$$t = 0{,}937 t_g^{2/5} H^{4/5} \left(\frac{A}{H^2} \right)^{3/5} \left(\frac{z}{H} \right)^{-0{,}69} \quad (14.10)$$

Таблица 14.1 Теплоотдача в конце времени эвакуации для уравнения задымления при нестационарном пожаре

Время эвакуации Мин.	Медленный пожар t_g=600 с кВт	Средний пожар t_g=300 с кВт	Быстрый пожар t_g=150 с кВт	Сверхбыстрый пожар t_g=75 с кВт
15	2 370	9 500	38 000	152 000
20	4 220	16 900	67 500	270 000
25	6 590	26 400	106 000	422 000
30	9 500	38 000	152 000	608 000

Примечания:

1. t_g – это время развития квадратичного пожара, за которое пожар достигает мощности 1055 кВт.

2. Поскольку пожары к концу времени эвакуации сильные, уравнение задымления при нестационарном пожаре имеет ограниченное применение.

Компьютерное моделирование

Высоту дымового слоя над поверхностью топлива иногда называют *чистой высотой,* и на рис.14.5 показано сравнение чистых высот, смоделированных разными программами зонного моделирования пожаров и уравнением задымления при стационарном пожаре. Эти прогнозы составлены для большого атриума с условием H = 30,5 м и A = 5280 м^2 при стационарном пожаре мощностью 5270 кВт. Можно заметить, что прогнозы, полученные с помощью программ ASET-C и AZONE, почти совпадают. Прогнозы, полученные с помощью программы CFAST и уравнения задымления при стационарном пожаре, дают более низкие показатели чистой высоты.

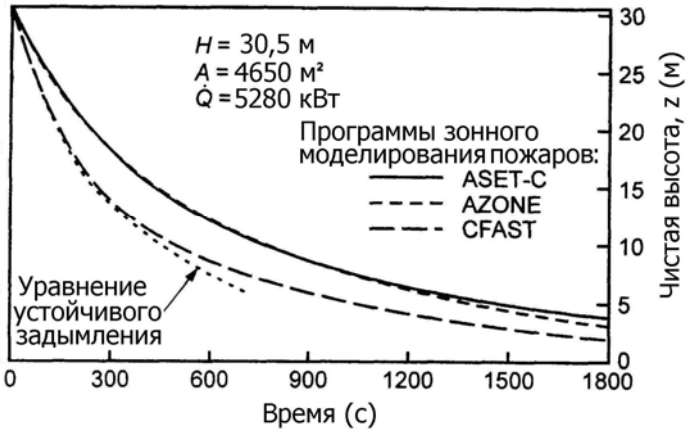


Рис. 14.5 Сравнение чистых высот, смоделированных разными программами

Разница в прогнозируемых значениях чистой высоты может быть объяснена существенными различиями в инструментах прогнозирования. Эти инструменты включают в себя: (1) модели струи, (2) определение чистой высоты, и (3) подход к теплопередаче. В каждой зонной модели массовый расход струи рассчитывается в соответствии с разными моделями струи.

Как указано выше, эмпирическое уравнение завышено в том, что оно прогнозирует значение чистой высоты как первые признаки дыма над огнём, что показано на рис.14.3. Программы зонного моделирования прогнозируют значение чистой высоты как границу дымового слоя. По этим причинам ожидается, что прогнозы на основе эмпирического уравнения задымления при стационарном пожаре приведут к более низким показателям высот, чем прогнозы программ зонного моделирования.

В каждой из программ зонного моделирования теплопередача рассчитывалась по-разному. При моделировании в программе CFAST расчёт теплопоглощения стенами и потолком из гипсокартона основан на разнице температур между дымовым слоем и гипсокартоном. Для расчёта теплопередачи в программах ASET-C и AZONE используются параметры.

В программе ASET-C расчёт теплопередачи осуществляется с помощью *коэффициента теплопотери,* λ_c, который является долей выделения тепла при пожаре, поглощаемой ограничивающими поверхностями помещения и его содержимым. Коэффициент теплопотери обычно находится в пределах от 0,6 до 0,9. В программе AZONE подсчёт теплопередачи осуществляется с помощью конвективной доли, χ_c, и доли теплопоглощения стенами, η. Конвективная доля – это конвективная составляющая теплоотдачи. Доля теплопоглощения стенами – это доля энтальпии струи, втекающей в дымовой слой, поглощаемая стенами и потолком.

Температуры дыма, связанные с чистыми высотами, показанными на рис.14.5, отражены на рис.14.6. Для программы ASET-C было выбрано значение λ_c = 0,6. В программе AZONE использовались значения χ_c = 0,7 и η = 0,4. Параметры соотносятся как $\lambda_c = 1 - \chi_c(1-\eta)$ и, таким образом, моделирование с помощью программы AZONE эффективно осуществлялось при λ_c = 1 – 0,7(1 – 0,4) = 0,58. Неудивительно, что температуры дыма почти одинаковы для моделей, созданных с помощью программы ASET-C и программы AZONE (рис.14.6).

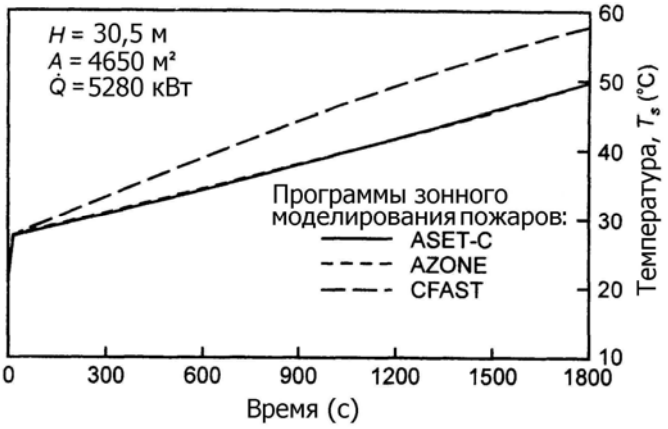


Рис. 14.6 Сравнение температур дымового слоя, смоделированных разными программами

Температура дыма в модели, созданной с помощью программы CFAST, была выше, но коэффициенты конвекции, на которых основано теплопоглощение стенами, рассчитываются на основании общих корреляций. Для противопожарных отсеков не было разработано специальных коэффициентов конвекции.

Механическая вытяжная вентиляция

Механическая вытяжная вентиляция является, вероятно, наиболее распространённой формой противодымной защиты атриумов в Северной Америке. Как и в случае с естественной вентиляцией, механическая дымовытяжная вентиляция может быть основана на стационарном или нестационарном расчётном пожаре. Уравнения, представленные в следующем разделе относятся к стационарному пожару, а программы зонного моделирования пожаров могут использоваться для расчёта дымового потока при нестационарном пожаре.

Условия при стационарном пожаре

Метод расчёта, представленный в данном разделе, основан на упрощающих допущениях, приведённых ниже.

Единственный поток массы, входящий в дымовой слой – струя от пожара.

Единственный поток массы, выходящий из дымового слоя – вытяжной дымовой поток.

Вытяжная вентиляция удаляет только дым, и в неё не попадает воздух из-под дымового слоя. Высота дымового слоя постоянна (рис.14.7). Потоки, входящие в дымовой слой и выходящие из него, находятся в равновесии.

Теплообмен между дымовым слоем и окружающей средой достиг равновесия.

Прежде чем использовать этот метод, проектировщикам необходимо удостовериться, что эти допущения соответствуют их прикладной задаче.

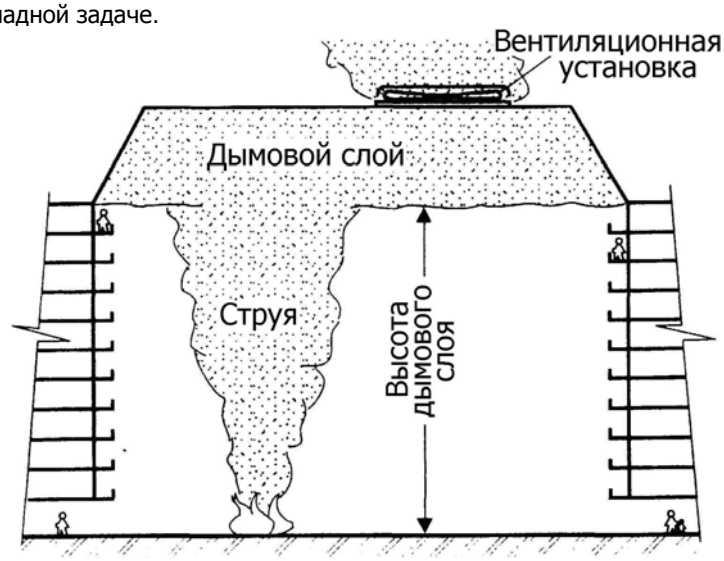


Рис. 14.7 Механическая вытяжная вентиляция и постоянное значение чистой высоты

Чтобы рассчитать расход вытяжного потока, уравнения струи из раздела «Основные положения противодымной защиты атриумов» адаптированы переменными, которые были переопределены для следующего практического применения:

$$\dot{m} = 0{,}071\dot{Q}_c^{\,1/3} z^{5/3} + 0{,}0018\dot{Q}_c \qquad \text{для } z \geq z_1 \tag{14.11}$$

и

$$\dot{m} = 0{,}032\dot{Q}_c^{\,3/5} z \quad \text{для } z<z_1 \tag{14.12}$$

где

$\dot{m}$ = массовый расход вытяжного воздуха, кг/с;

$\dot{Q}_c$ = конвективная теплоотдача при пожаре, кВт;

z = высота границы дымового слоя над топливом, м;

z_1 = средняя высота пламени, м.

Средняя высота пламени равна:

$$z_1 = 0{,}166\dot{Q}_c^{\,2/5} \tag{14.13}$$

Собственно говоря, уравнения (14.11) и (14.12) предназначены для массового расхода осесимметричной струи в верхний слой. Когда уравнения осесимметричной струи не подходят, можно использовать другие уравнения струи. Уравнения растекающихся балконных струй и оконных струй смотрите в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов».

Конвективная теплоотдача, $\dot{Q}_c$, равна:

$$\dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q} \tag{14.14}$$

где

χ_c = конвективная доля теплоотдачи;

$\dot{Q}$ = суммарное выделение тепла, кВт.

Для удобства термин *высота дымового слоя* будет использоваться в значении высота границы дымового слоя. Значение z – это высота дымового слоя над поверхностью топлива.

Температура дымового слоя может быть выражена уравнением:

$$T_s = T_o + \frac{\dot{Q}_c (1 - \eta)}{\dot{m} C_p} \tag{14.15}$$

где

T_s = температура дымового слоя, °C;

T_o = температура окружающей среды, °C;

$\dot{m}$ = массовый расход вытяжного воздуха, кг/с;

$\dot{Q}_c$ = конвективная теплоотдача при пожаре, кВт;

C_p = удельная теплоёмкость газов струи, кДж/кг °C;

η = доля теплопоглощения стенами (в относительных единицах).

Как описано выше, параметр «доля теплопоглощения стенами» есть конвективная доля теплоотдачи, переносимой к стенам и потолку атриума. Этот параметр зависит от ряда условий, включая геометрию пространства, температуру дымового слоя и материалы, из которых выполнены стены и потолок.

Атриум, в котором не происходит теплопередачи, называют адиабатическим ($\eta = 0$). Адиабатическое условие завышено в том, что при прогнозировании оно приводит к большим значениям объёмного удаления дыма, но оно не завышено в отношении «эффекта прокалывания». Из-за отсутствия исследований касательно доли теплопоглощения стенами, предполагается, что значения η находятся в пределах от 0,3 до 0,7 для стен и потолков из обычных стройматериалов (кирпич, бетон, стекло, гипсокартон, и т.д.).

Плотность выходящего газа может быть рассчитана по закону идеального газа,

$$\rho_s = \frac{p}{R T_s} \tag{14.16}$$

где

ρ_s = плотность выходящего газа, кг/м^3;

p = атмосферное давление, Па;

R = газовая константа, Дж/кг K;

T_s = абсолютная температура выходящего газа, K.

Кроме того, плотность выходящего газа можно вычислить с помощью уравнения:

$$\rho_s = \rho_r \frac{T_r}{T_s} \tag{14.17}$$

где

T_r = абсолютная исходная температура, K;

ρ_r = плотность при исходной температуре, кг/м^3.

Существует бесконечное количество пар $T_r - \rho_r$, которые могут быть использованы в уравнении (14.17), и одна из таких пар – 294 K и 1,20 кг/м^3.

Объёмный расход выходящего газа в струе равен:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_p} \tag{14.18}$$

где

$\dot{V}$ = объёмный расход выходящего газа, м^3/с;

$\dot{m}$ = массовый расход вытяжного воздуха, кг/с;

ρ_p = плотность выходящего газа, кг/м^3;

Пример 14.2 Удаление дыма при стационарном пожаре

Каково удаление дыма, необходимое для поддержания высоты дымового слоя на уровне 11,0 м при параметрах моделирования, перечисленных ниже?

Температура окружающей среды	22°C
Высота потолка	13,7 м
Конвективная доля	0,7
Высота верхней границы топлива	0 м
Скорость выделения тепла	2110 кВт
Доля теплопоглощения стенами	0,4
Удельная теплоёмкость газов струи	1,00 кДж/кг °C

Обратите внимание, что глубина дымового слоя равна: 13,7 – 11 = 2,7 м, что составляет 20% высоты от топлива до потолка атриума. Эта глубина включает в себя образование припотолочной струи (см. подраздел «Минимальная глубина дымового слоя» в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов»).

Согласно уравнению (14.14), конвективная теплоотдача равна:

$$\dot{Q}_c = \chi_c \dot{Q} = 0{,}7(2110) = 1477 кВт.$$

Согласно уравнению (14.13), средняя высота пламени равна:

$$z_1 = 0{,}166\dot{Q}_c^{\,2/5} = 0{,}166(1477)^{0.4} = 3{,}0 м$$

Высота дымового слоя, z, равна 11,0 м.

Поскольку $z_1 < z$, массовый расход рассчитывается по уравнению (14.11):

$$\dot{m} = 0{,}071\dot{Q}_c^{\,1/3} z^{5/3} + 0{,}0018\dot{Q}_c = 0{,}071(1477^{1/3})(11^{5/3}) + 0{,}0018(1477) = 46{,}6 кг/с$$

Согласно уравнению (14.15), температура дыма равна:

$$T_s = T_o + \frac{\dot{Q}_c(1-\eta)}{\dot{m}C_p} = 22 + \frac{1477\,(1-0{,}4)}{46{,}6(1{,}00)} = 41^\circ C$$

Согласно уравнению (14.17), плотность дыма равна:

$$\rho_s = p_r \frac{p_r}{T_s} = 1{,}12 кг/м^3.$$

Согласно уравнению (14.18), объёмный расход выходящего газа равен:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_p} = \frac{46{,}6}{1{,}12} = 41{,}6 м^3/с.$$

Условия при нестационарном пожаре

Анализ условий работы вытяжной системы атриума при нестационарном пожаре может быть проведён с целью:

- смоделировать сочетание заполнения дымом с дымоудалением,
- смоделировать условия нестационарного пожара, и
- определить влияние времени активации вытяжных систем на глубину дымового слоя.

Сочетание заполнения дымом с дымоудалением может быть использовано для атриума, который имеет недостаточно большие размеры, чтобы противодымная защита осуществлялась только на основе данных по заполнению дымом. Для этого комбинированного подхода вытяжные вентиляторы должны быть таких размеров, чтобы время заполнения дымом было больше времени эвакуации, включая время, необходимое на то, чтобы понять, что начался пожар и приготовиться двигаться к выходу.

По своей природе пожар является неустойчивым процессом. Причиной, объясняющей широкое применение стационарных пожаров в моделировании, вероятно, является то, что оно приводит к простому устойчивому анализу наподобие того, что приводится выше. Несмотря на то, что большие стационарные расчётные пожары могут быть выбраны в целях получения завышенных моделей, такие расчётные пожары нереалистичны. Программы зонного моделирования пожаров, такие как CFAST и AZONE могут применяться для расчёта работы систем дымовытяжной вентиляции атриумов при нестационарных пожарах.

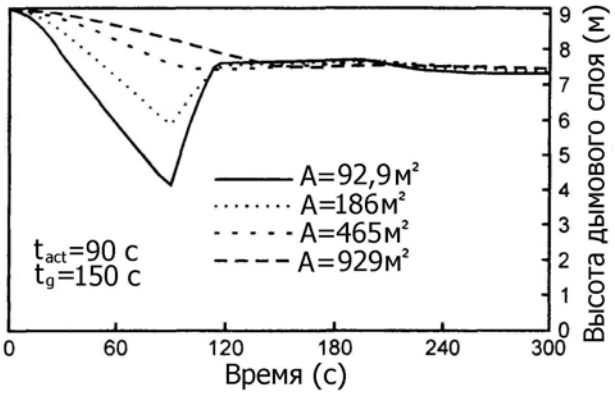
Для того чтобы включилась дымовытяжная вентиляция, необходимо распознать пожар. Существует задержка между временем распознания пожара и срабатыванием дымовытяжной вентиляции. Кроме того, вентиляционной установке требуется время, чтобы начать работать на полную мощность. Время распознания пожара может быть установлено на основе информации о времени запаздывания основной и потолочной струи, о котором шла речь в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов». При необходимости, распознание должно учитывать вероятность того, что под потолком может находиться стратифицированный слой горячего воздуха. Это мы обсудим далее.

Существует вероятность того, что дымовой слой может опуститься значительно ниже уровня дымового слоя, полученного в результате расчёта условий при стационарном пожаре. Для проверки результата активации программа AZONE позволяет пользователю задавать время активации дымовытяжной вентиляции.

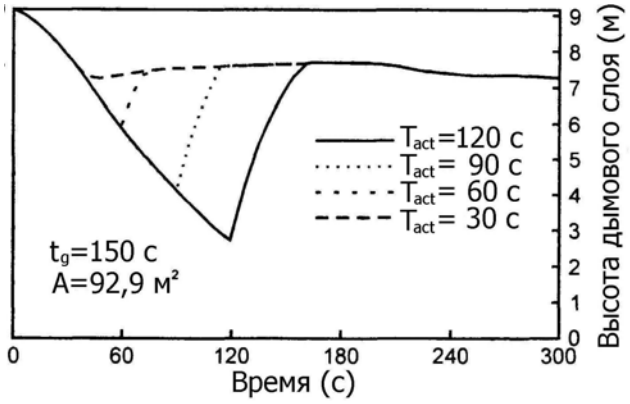
На рис.14.8a показано влияние площади атриума на высоту дымового слоя согласно расчётам в программе AZONE для атриума высотой 9,14 м при времени активации вытяжной системы равном 90 с. Можно увидеть, что при площади атриума $A \geq 465$ м^2, отсрочка активации не оказывает неблагоприятного воздействия на высоту дымового слоя в условиях моделирования. Когда $A \leq 186$ м^2, дымовой слой опускается значительно ниже проектируемой высоты в условиях моделирования.

На рис.14.8b показано влияние времени активации вытяжной системы, t_{act}, на высоту дымового слоя для атриума высотой 9,14 м и площадью A = 92,9 м^2. Как предполагалось, чем меньше время активации, тем меньше влияние на высоту дымового слоя. При t_{act} = 30 с, дымовой слой остаётся выше проектируемой высоты в течение всего процесса моделирования.

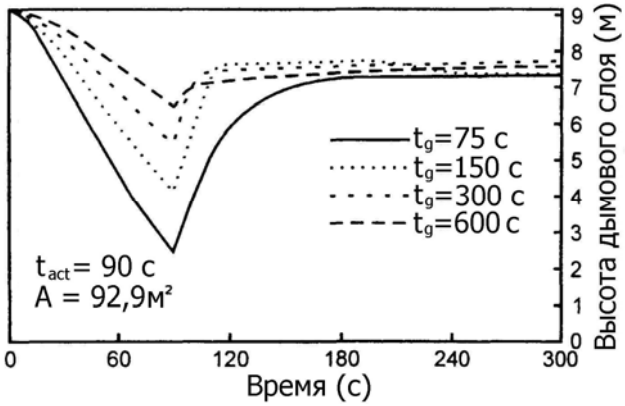
На рис.14.8c показано влияние времени развития пожара, t_g, на высоту дымового слоя для атриума высотой 9,14 м и площадью A = 92,9 м^2. Как предполагалось, чем меньше время развития пожара (чем быстрее распространяется пожар), тем больше влияние на высоту дымового слоя.



(a) Изменение дымового слоя в зависимости от площади атриума, A



(b) Изменение дымового слоя в зависимости от времени активации дымовытяжной системы, t_{act}



(c) Изменение дымового слоя в зависимости от времени развития пожара, t_g

Примечание:

1. Под пожаром здесь подразумевается квадратичный пожар мощностью до 2110 кВт, после чего скорость выделения тепла остаётся постоянной.
2. Скорость вытяжного потока выбрана с учётом того, чтобы толщина дымового слоя составляла 1,83 м при постоянной скорости выделения тепла 2110 кВт.
3. Как и в других программах зонного моделирования пожаров, элементы припотолочной струи не моделируются программой AZONE. Поэтому реалистичными являются только те участки этих графиков, где дымовой слой ниже 7,3 м.
4. Другие параметры:

Температура окружающей среды, T_a = 22,2 °C
Высота потолка, H = 9,1 м
Высота верхней границы топлива, H_m = 0 м
Скорость вытяжного потока, V = 23,4 m^3/s
Коэффициент расположения вытяжки, β = 2
Коэффициент расположения вытяжки под потолком, d_i = 0 м
Количество вытяжных отверстий, N_{inlets} = 6
Доля теплопоглощения стенами, $\eta = 0{,}4$

Рис. 14.8 Колебания высоты дымового слоя, смоделированной в программе AZONE

Несмотря на то, что исследований о влиянии времени активации на высоту дымового слоя не проводилось, можно вывести некоторые общие правила. Для атриумов относительно большой площади $(A/H^2 > 5$, где H – высота атриума) предполагается, что влияние активации вентиляции через 90 с. не будет иметь негативного воздействия на высоту дымового слоя. Для атриумов относительно малой площади $(A/H^2 < 5)$, дымовой слой может опускаться ниже расчётной высоты, что приведёт к контакту людей с дымом. Программа AZONE может использоваться для расчёта влияния времени активации на высоту дымового слоя.

Приточный воздух

Для устойчивого потока, массовый поток воздуха или дыма, удаляемого из верхней части атриума равен массовому потоку воздуха, поступающему под дымовой слой. Поток воздуха, поступающего в атриум, называют приточным воздухом, и приточный воздух может подаваться либо естественным путём, либо с помощью механической вентиляционной системы.

Приточный воздух, поступающий через механическую вентиляционную систему, имеет скорость, которая обычно составляет 90% и 97% скорости вытяжного потока, и баланс воздуха, необходимого для того, чтобы вместить вытяжной поток, естественным образом нарушается из-за утечек через проёмы и другие каналы. Приточный воздух, поступающий естественным путём, поступает через проёмы, такие как открытые двери и вентиляционные отверстия, и иногда путь, который проделывает приточный воздух, представляет собой сложную комбинацию помещений и коридоров. Компьютерные программы, исследующие взаимодействие воздушных потоков, такие как CONTAM, могут применяться для расчёта этих сложных потоковых систем.

Скорость приточного воздуха не должна нарушать структуру струи или значительным образом изменять направление струи под углом. Считается, что удерживание скорости на уровне 1 м/с или менее предотвращает такое нарушение струи.

Естественная вентиляция

Естественная дымовытяжная вентиляция распространена во многих частях света, таких как Европа, Австралия и Новая Зеландия. Она получила развитие в результате ряда трагедий, связанных с пожарами, произошедшими в XIX и начале XX века.

Естественная вентиляция строится на силе плавучести горячего воздуха, выталкивающей дым из открытых вентиляционных отверстий на крыше атриума или рядом с ней (рис.14.9). Естественная вентиляция может строиться на основе стационарного или нестационарного расчётного пожара. Уравнения в следующем разделе предназначены для стационарного пожара, а для расчёта дымового потока при нестационарном пожаре можно использовать программы зонного моделирования пожаров.

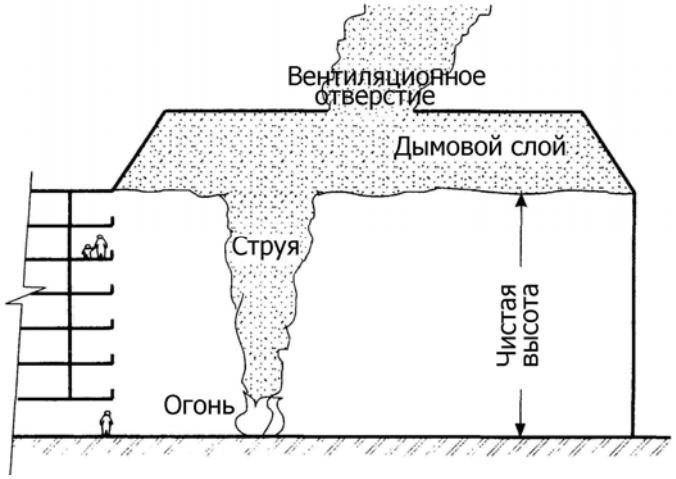


Рис. 14.9 Естественная вентиляция

Условия при стационарном пожаре

Уравнение, представленное в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов» для вычисления массового расхода через вентиляционное отверстие выглядит так:

$$\dot{m}_v = \frac{CA_v\rho_o\left[2gd_b\left(T_s - T_o\right)\left(T_o / T_s\right)\right]^{1/2}}{\left[T_s + \left(A_v / A_i\right)^2 T_o\right]^{1/2}} \qquad (14.19)$$

где

$\dot{m}_v$ = массовый расход через вентиляционное отверстие, кг/с;

C = коэффициент расхода (в относительных единицах);

A_v = площадь вентиляционного отверстия, м^2;

A_i = площадь входного вентиляционного отверстия, м^2;

ρ_o = плотность наружного воздуха, кг/м^3;

g = ускорение силы тяжести, 9,80 м/с^2;

d_b = глубина дымового слоя ниже дымовытяжного вентиляционного отверстия, м;

T_o = абсолютная температура наружного воздуха, K;

T_s = абсолютная температура дыма, K;

Поскольку плавучесть горячего воздуха является движущей силой естественной вентиляции, массовый расход через вентиляционное отверстие, $\dot{m}_v$, увеличивается вместе с увеличением температуры дыма, T_s. По мере разрастания пожара массовый расход струи в верхний слой увеличивается, и температура дымового слоя возрастает. При пожарах большего масштаба, чем расчётный пожар, температура дыма превышает прогнозируемое значение, и массовый расход через вентиляционное отверстие также превышает прогнозируемое значение. Это преимущество характерно для естественной вентиляции и благодаря ему удаётся нейтрализовать бóльшую часть дыма, возникающего при пожарах, превышающих по своим масштабам расчётный пожар.

В атриумах с кондиционерами возникает вероятность того, что температура дыма может оказаться ниже прогнозируемой наружной температуры в летний период. Это может привести к проникновению наружного воздуха в атриум через дымовытяжные вентиляционные отверстия. Во избежание подобного нисходящего потока через дымовытяжные вентиляционные отверстия естественную дымовытяжную вентиляцию не следует использовать, когда температура дыма может оказаться меньше прогнозируемой наружной температуры в летний период.

Температуру дыма и массовый расход струи можно рассчитать, используя те же уравнения, которые используются для механических вытяжных систем. Это мы обсудим далее.

Ветер

Если атриум находится рядом с высотным зданием, расположенным на открытой местности или примыкает к нему, ветер может создавать положительное давление на верху атриума, как показано на рис.14.10. Поскольку такие положительные значения давления могут нарушать естественную вентиляцию, не рекомендуется использовать естественную вентиляцию в атриумах, подверженных таким условиям.

Рис. 14.10 Схема ветрового потока, вызывающего избыточное давление на крыше атриума при наличии рядом высотного здания

Приточный воздух

При естественной вентиляции, описанной уравнением (14.19), приточный воздух естественным путём проходит через входной проём площадью A_i. Приточный воздух обычно поступает через открытые вентиляционные отверстия или дверные проёмы. Вытянутый атриум может быть разделён на несколько больших пространств, имеющих дымовытяжные вентиляционные отверстия, так, чтобы дымовытяжные вентиляционные отверстия на территориях, незанятых пожаром, могли быть открыты для поступления приточного воздуха.

Системы обеспечения безопасных условий

Как уже упоминалось, вышеперечисленные подходы имеют своей целью уберечь пользователей атриума от дыма в ходе эвакуации, в то время как системы обеспечения безопасных условий создаются с целью поддержания совместимых с жизнью условий во время воздействия дыма на пользователей здания.

Анализ опасности заключается в оценке перемещения дыма, движения людей (времени эвакуации) и пределов опасности. Перемещение дыма может быть смоделировано программами зонного моделирования пожаров, в то время как моделирование на основе вычислительной гидродинамики имеет значительное преимущество в моделировании колебаний температур и концентрации продуктов сгорания в дымовом слое. Анализ влияния опасных факторов пожара должен рассматривать такие вопросы, как дальность видимости, отравление газами и тепловое воздействие.

Стратификация и обнаружение дыма

Слой горячего воздуха часто формируется под потолком атриума в результате солнечного излучения на крыше атриума. Несмотря на то, что исследования этого стратифицированного слоя не проводились, проектировщики зданий отмечают, что температуры таких слоёв часто превышают 50°C. Температуры под этим слоем контролируются отопительно-охладительной системой здания, и можно считать, что профиль температуры значительно увеличивается при небольшом увеличении по высоте как показано на рис.14.11.

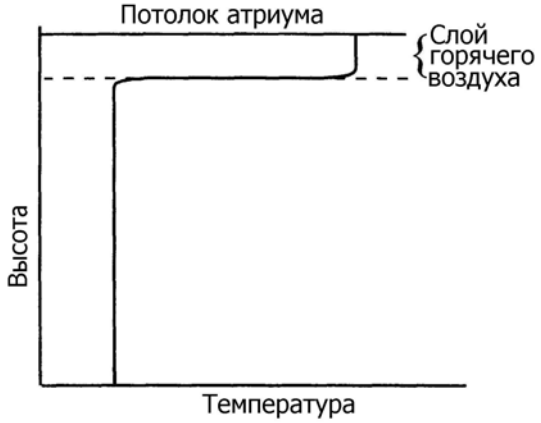


Рис. 14.11 Профиль температуры слоя горячего воздуха под потолком атриума

Когда средняя температура струи меньше температуры слоя горячего воздуха, дым образует стратифицированный слой под ним, как показано на рис.14.12. Средние температуры струи показаны на рис.14.13, и можно отметить, что средняя температура струи часто имеет меньшее значение, чем прогнозируемые температуры слоя горячего воздуха. Таким образом, когда под потолком атриума образуется слой горячего воздуха, нельзя ожидать, что дым сможет достичь потолка атриума, и что сработают детекторы дыма, закреплённые на потолке.

Рис. 14.12 Стратификация дыма под слоем горячего воздуха

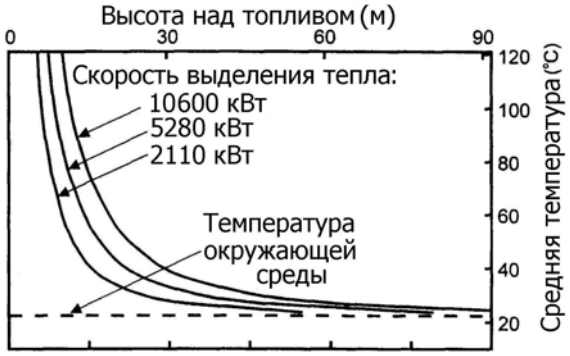


Рис. 14.13 Средняя температура осесимметричной струи

Для устранения этого недостатка можно использовать лучевые детекторы дыма. Ниже перечислены подходы к обнаружению дыма, используя которые можно обеспечить быстрое обнаружение дыма, независимо от температуры воздуха под потолком во время появления пожара.

a. Луч под восходящим углом для обнаружения дымового слоя

Целью данного подхода является быстрое обнаружение формирующегося дымового слоя при существующих температурных условиях. Один или несколько лучей направлены вверх под углом, чтобы пересекать дымовой слой, независимо от степени стратификации дыма.

С целью избыточности при использовании данного подхода рекомендуется устанавливать более одного детектора дыма.

b. Горизонтальные лучи для обнаружения дымового слоя на разных уровнях.

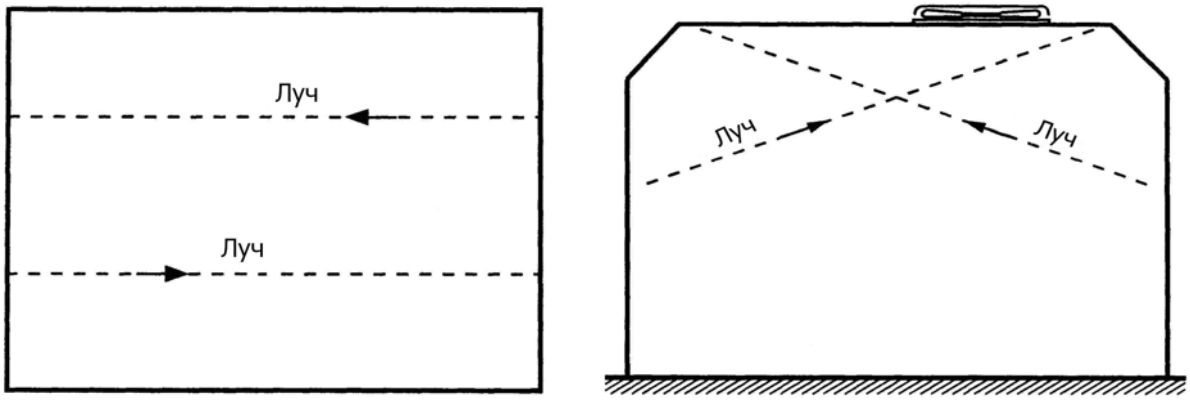
Целью данного подхода является быстрое определение развития дымового слоя, независимо от температурных условий. Один или более лучевых детекторов расположены на уровне крыши. Дополнительные детекторы расположены на других более низких уровнях. Точное расположение лучей является задачей специального проектирования, но должно включать лучи в основании определённых помещений без кондиционированного воздуха и на уровне смоделированного дымового слоя или рядом с ним с несколькими промежуточными лучами на других уровнях.

c. Горизонтальные лучи для обнаружения дымовой струи

Целью данного подхода является обнаружение растущей струи, а не дымового слоя. При этом подходе комбинация лучей устанавливается на уровне ниже самого нижнего прогнозируемого уровня стратификации. Необходимо, чтобы эти лучи располагались близко друг к другу, чтобы обеспечить пересечение струи с ними; расстояние между лучами основано на ширине луча на наименьшей высоте над точкой потенциала пожара.

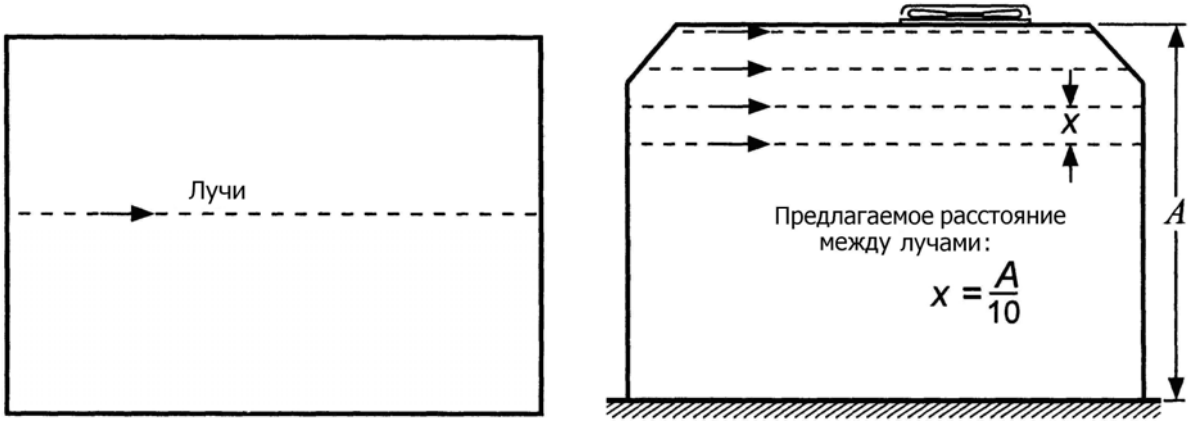
Описанные выше подходы отражены на рис.14.14, и преимущество подхода (a) заключается в том, что при нём не требуется расположение нескольких горизонтальных лучей. Некоторые лучевые детекторы дыма срабатывают под воздействием солнечных лучей, а вариант (a) сводит к минимуму вероятность такой ложной активации благодаря тому, что ресивер (приёмник) направлен под углом вниз.

Необходимо, чтобы все компоненты лучевого детектора дыма были расположены так, чтобы быть доступными для ремонта или технического обслуживания. При расположении, изображённом на рис.14.14, доступ для технического обслуживания может осуществляться через отверстие на крыше (не показано).



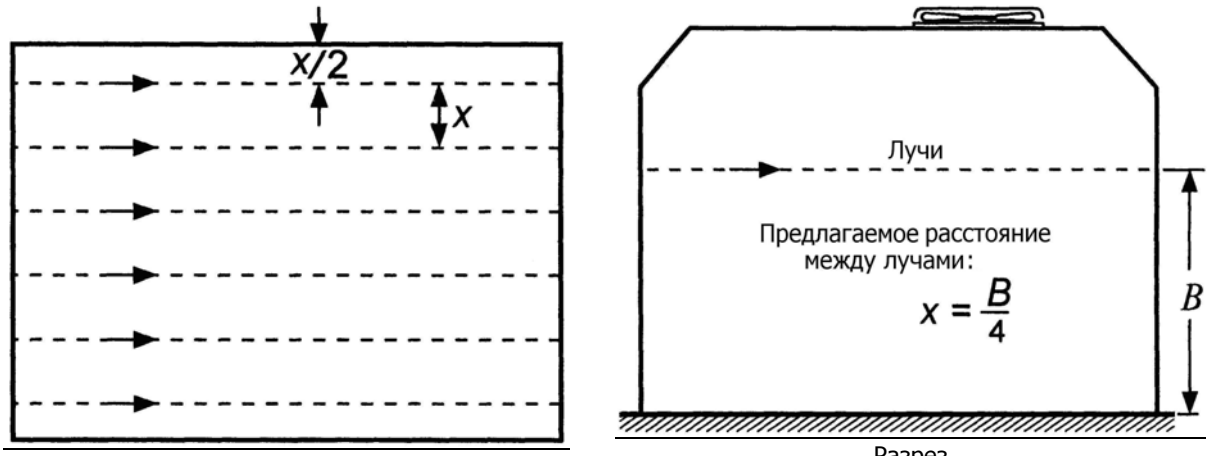
Вид в плане Разрез

(a) Лучи, направленные под углом вверх, для обнаружения дымового слоя



Вид в плане Разрез

(b) Горизонтальные лучи для обнаружения дымового слоя на разных уровнях



(c) Горизонтальные лучи для обнаружения дымовой струи

Рис. 14.14 Расположение лучевых детекторов дыма

Минимальная глубина дымового слоя

Дымовой слой должен быть достаточно глубоким, чтобы вместить припотолочную струю. Толщина припотолочной струи находится в пределах 10% - 20% высоты от поверхности топлива до потолка. В большинстве прикладных программ требуется, чтобы дымовой слой составлял, как минимум, 20% высоты от верхней границы топлива до потолка, чтобы вместить припотолочную струю как при механических системах дымовытяжной вентиляции, так и естественной вентиляции.

«Эффект прокалывания»

Когда скорость дымового потока в вентиляционном отверстии относительно высока, воздух из-под дымового слоя может засасываться в дымовытяжную систему. Это явление называется «эффектом прокалывания», и оно может происходить и при естественной дымовытяжной вентиляции. Для предотвращения «эффекта прокалывания» может потребоваться поделить площадь вытяжки или вентиляционного отверстия на несколько вытяжных отверстий. Уравнения для расчёта количества вытяжных отверстий, необходимого для предотвращения «эффекта прокалывания», и расчёта минимального расстояния между отверстиями приведены в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов».

Помещения, расположенные за пределами атриума

Помещения, расположенные за пределами атриума, могут быть либо отделены от атриума, либо напрямую соединяться с пространством атриума. Отделённые пространства изолированы от атриума противодымными барьерами, и эти противодымные барьеры являются вертикальными или горизонтальными перегородками, спроектированными и сооружёнными с целью противостоять движению дыма. Стены, пол и потолки могут быть противодымными барьерами, и эти барьеры могут иметь коэффициент огнестойкости. Противодымные барьеры могут иметь дверные или другие проёмы, снабжённые автоматически закрывающимися системами, такими как двери или дымовые заслонки. Отделённые пространства зависят от целостности противодымных барьеров, а также могут зависеть от противодымного контроля на основе подпора воздуха.

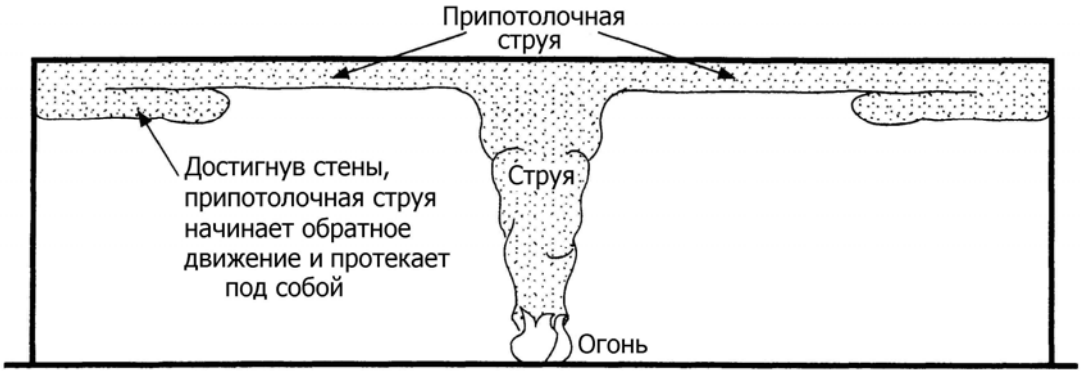
Смежное помещение – это помещение, которое соединено с атриумом открытой зоной. Подпор воздуха может использоваться для создания противодымной защиты смежных пространств, как описано в разделе «Основные положения противодымной защиты атриумов». Поскольку подпор воздуха обеспечивает пожар воздухом для горения, этот метод следует использовать с осторожностью.

Атриумы неправильной формы

Большинство программ зонного моделирования пожаров предназначено только для помещений или атриумов с площадью постоянного поперечного сечения. На рис.14.15a показано образование припотолочной струи в помещении с постоянной площадью поперечного сечения. Достигнув стены, припотолочная струя начинает обратное движение и протекает под собой.

В помещениях с выгнутым потолком припотолочная струя, как правило, соединяется с потолком и стекает по кривой. На рис.14.15b показана припотолочная струя, стекающая вниз вдоль кривой потолка; такое стекание препятствует нормальному формированию дымового слоя. Такой вид течения струи нельзя смоделировать с помощью программ зонного моделирования пожаров, но можно смоделировать с помощью масштабного моделирования и вычислительной гидродинамики.

Программа AZONE, описанная в следующем разделе, даёт возможность моделировать площади переменного поперечного сечения и получать полезные результаты при условии, что форма атриума позволяет сформироваться нормальному дымовому слою.



(a) Припотолочная струя, достигнувшая стены, и начинающая обратное движение

(b) Припотолочная струя, стекающая вниз по кривой потолка

Рис. 14.15 Диаграммы течения припотолочной струи

AZONE: программа зонного моделирования пожаров в атриумах

Программа AZONE предназначена для зонного моделирования пожаров и выполнения инженерных расчётов. Основные возможности программы AZONE:

- стационарные и нестационарные пожары,
- уравнение Хескестада для массового расхода струи (в соответствии со стандартом NFPA 92B [4]),
- площади постоянного и переменного сечения,
- «эффект прокалывания».

В России существует русскоязычная адаптация программы AZONE – программа СИТИС:Атриум, информация о которой доступна на сайте www.sitis.ru.

На рис.14.16 представлена упрощённая блок-схема программы AZONE.

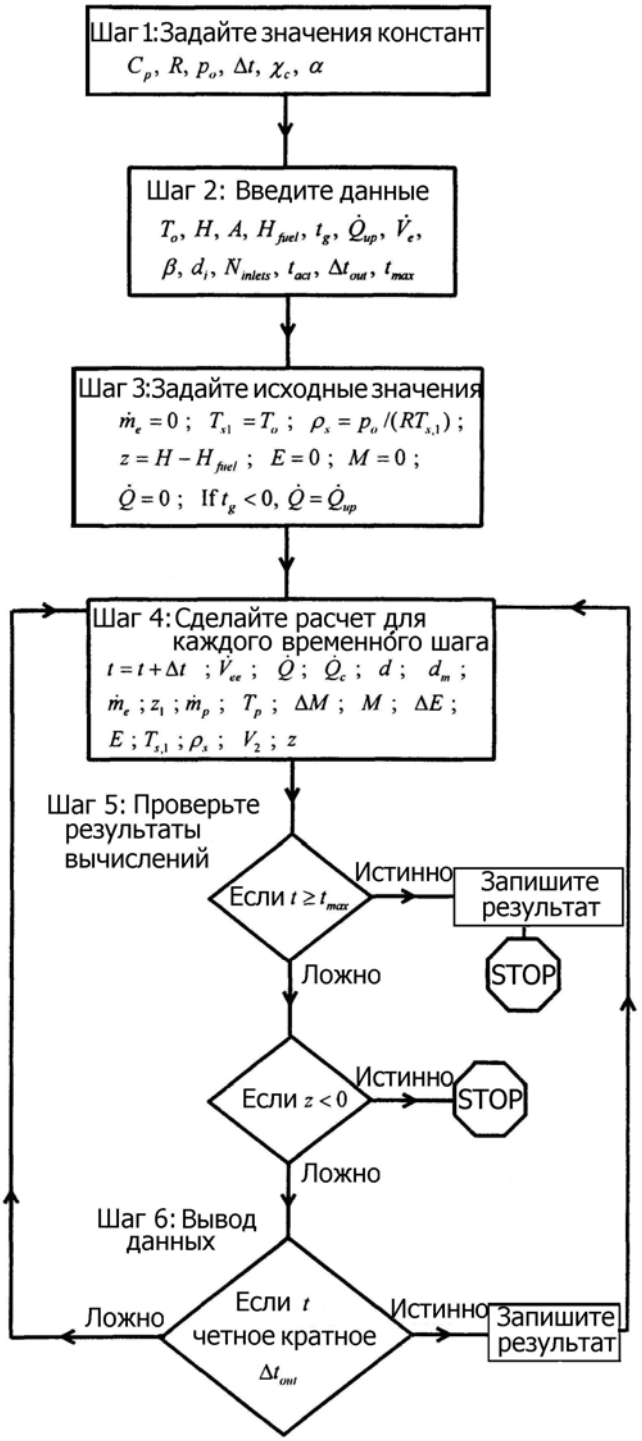


Рис. 14.16 Упрощенная блок-схема для программы AZONE

Концепция программы AZONE

В программе AZONE моделируется дымовой слой и считается, что давление в нижележащем слое равно атмосферному давлению, а его температура – температуре окружающей среды. Поскольку программа не моделирует ни приточный воздух, ни утечку воздуха из нижележащего слоя, их следует моделировать отдельно в специальном приложении.

Изменение массы дымового слоя может быть выражено следующим образом:

$$\Delta M = \left(\dot{m}_p - \dot{m}_e\right)\Delta t \tag{14.20}$$

где

ΔM = изменение массы дымового слоя в течение временно́го интервала, кг;

Δt = временной интервал, с;

$\dot{m}_p$ = массовый расход струи в дымовой слой, кг/с;

$\dot{m}_e$ = массовый расход из дымового слоя, кг/с.

Массовый расход струи, $\dot{m}_p$, рассчитывается на основе уравнений для осесимметричной струи, но можно использовать и уравнения для других видов струй. Массовый расход вытяжного воздуха, $\dot{m}_e$, включает в себя «эффект прокалывания», как описано ниже.

Для простоты массовые расходы, m и m_e, рассчитываются на конец интервала, и используется маленький интервал с целью свести ошибки к минимуму. Однако, эти массовые расходы можно рассчитать на момент времени внутри выбранного интервала с тем, чтобы можно было использовать больший интервал.

Масса дыма в слое на конец интервала может быть выражена следующим образом:

$$M_2 = M_1 + \Delta M \tag{14.21}$$

где

M_1 = масса дымового слоя в начале временно́го интервала, кг.

M_2 = масса дымового слоя в конце временно́го интервала, кг.

Изменение энергии дымового слоя может быть выражено следующим образом:

$$\Delta E = C_p \left[\dot{m}_p T_p - \dot{m}_e T_{s1} - \eta \dot{m}_p \left(T_p - To \right) \right] \Delta t \tag{14.22}$$

где

ΔE = изменение энергии дымового слоя, кДж;

C_p = удельная теплоёмкость дыма, кДж/кг K;

η = доля теплопоглощения стенами (в относительных единицах);

T_p = абсолютная температура газов струи, проникающих в дымовой слой, K;

T_{s1} = абсолютная температура газов дымового слоя в начале отрезка времени, K;

T_o = абсолютная температура окружающей среды, K.

Как и в случае с массовыми расходами, T_p рассчитывается на конец временно́го интервала. Температура окружающей среды считается неизменной на протяжении всех расчётов. Температура дыма, T_{s1}, в начале временно́го интервала использовалась потому, что её значение в конце интервала неизвестно. Выбор маленького интервала приводит к тому, что суммарная погрешность (итоговая ошибка) незначительна.

Энергия дымового слоя равна:

$$E_2 = E_1 + \Delta E \tag{14.23}$$

где

E_1 = энергия дымового слоя в начале временно́го интервала (кДж);

E_2 = энергия дымового слоя в конце временно́го интервала (кДж).

Температура дыма, T_{s2}, в конце временно́го интервала равна:

$$T_{s2} = \frac{E_2}{C_p M_2} \tag{14.24}$$

Плотность дымового слоя равна:

$$\rho_{s2} = \frac{p_o}{R T_{s2}} \tag{14.25}$$

где

ρ_{o2} = плотность дыма в конце интервала времени, кг/м^2;

p_o = давление окружающей среды, Па;

R = газовая константа, Дж/кг K.

Объём, V_2, дымового слоя равен:

$$V_2 = \frac{M_2}{\rho_{s2}} \tag{14.26}$$

В атриуме с постоянным поперечным сечением высота дымового слоя над поверхностью топлива равна:

$$z_2 = H - H_{fuel} - \frac{V_2}{A} \tag{14.27}$$

где

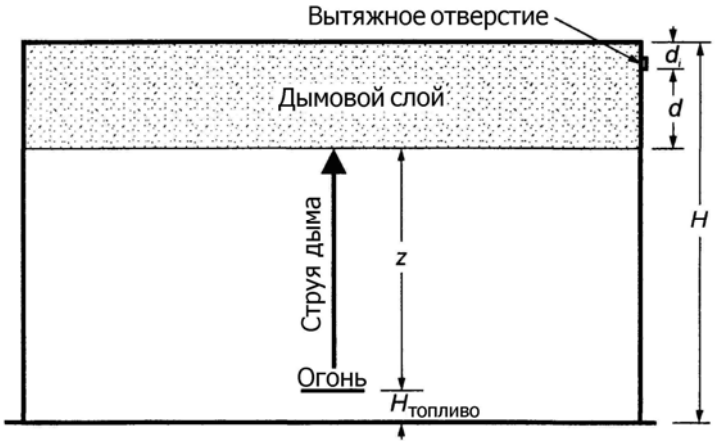
z_2 = высота дымового слоя над поверхностью топлива, м;

H = высота атриума, м;

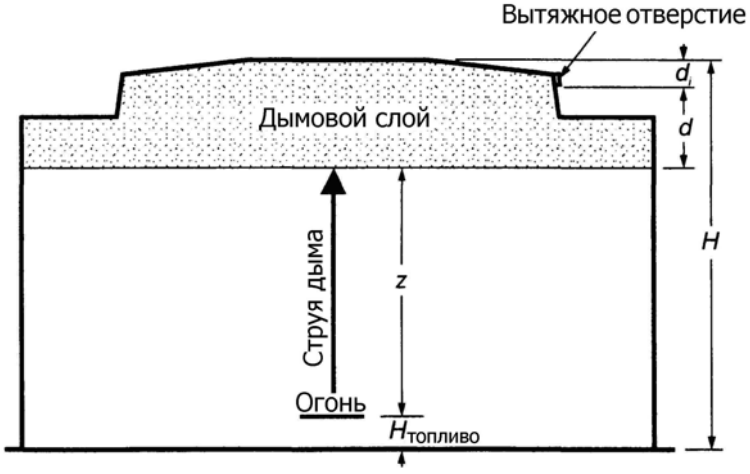
H_{fuel} = высота топлива, м;

A = площадь поперечного сечения атриума, м^2.

Следует отметить, что определение H в программе AZONE отличается от её определения, применяющегося в эмпирических уравнениях задымления. Разные высоты, перечисленные выше, представлены на рис.14.17. Определение значения z_2 для атриума переменной площади мы обсудим далее. Значения на конец текущего временно́го шага становятся значениями на начало следующего временно́го шага.



(a) Атриум с площадью постоянного поперечного сечения



(b) Атриум с площадью переменного поперечного сечения

Рис. 14.17 Диаграммы атриума для алгоритма AZONE

«Эффект прокалывания»

Для каждого интервала времени массовый расход вытяжного воздуха из дымового слоя, m_e, рассчитывается с учётом возможного «эффекта прокалывания». Минимальная глубина дымового слоя для предотвращения «эффекта прокалывания» равна:

$$d_m = \frac{\dot{V}_{ee}^{\,2/5}}{0{,}15\beta^{2/5}\left[T_o\left(T_{s1} - T_o\right)\right]^{1/5}} \tag{14.28}$$

где

d_m = минимальная глубина дымового слоя для предотвращения «эффекта прокалывания», м;

$\dot{V}_{ee}$ = объёмный расход на каждое вытяжное отверстие, м^3/с;

β = коэффициент расположения вытяжных отверстий (в относительных единицах).

Объёмный расход на каждое отверстие равен: $\dot{V}_{ee} = \dot{V}_e / N_{inlets}$, где N_{inlets} - количество вытяжных отверстий. Массовый расход вытяжного воздуха из дымового слоя равен:

$$\dot{m}_e = N_{inlets}\rho_s \dot{V}_{ee}\left(\frac{d}{d_m}\right)^{\alpha} \quad \text{для} \quad 0 \le d < d_m \tag{14.29}$$

или

$$\dot{m}_e = N_{inlets}\rho_s \dot{V}_{ee} \quad \text{для} \quad d_m \le d$$

где

d = глубина дымового слоя ниже основания вытяжного отверстия, м;

α = экспонента «эффекта прокалывания» (в относительных единицах).

Переменная площадь атриума

Пары «высота – площадь» в убывающем порядке обозначаются h_i и A_i с индексами от *I* до *n.* Для каждой высоты, h_i , объём атриума, V_{ai} , над этой высотой равен:

$$V_{ai} = \sum_{j=1}^{i} \frac{1}{2}\left(h_{j-1} - h_j\right)\left(A_{j-1} + A_j\right) \tag{14.30}$$

Единицы измерения членов уравнения h_i , A_i и V_{ai} - м, м^2 и м^3 соответственно. Члены уравнения h_i , A_i и V_{ai} являются членами массива (последовательностью чисел), а подстрочные индексы *I* и *j* – это так называемые фиктивные переменные. Например, h_i , где *I* = 3, является третьим значением массива «высота». Прежде чем выполнять расчёты для интервалов времени, рассчитывают значения V_{ai} от *I* до *n*.

Площадь атриума на высоте *x* равна:

$$A(x) = A_{j-1} + \frac{\left(A_j - A_{j-1}\right)\left(h_j - x\right)}{h_j - h_{j-1}} \tag{14.31}$$

где

A(x) = площадь атриума над высотой *x*, м^2;

x = высота над полом атриума, м.

j = такая фиктивная переменная, при которой $h_j < x \le h_{j-1}$ '

Объём над высотой *x* равен:

$$V(x) = V_{aj-1} + \frac{1}{2}\left(z_{aj-1} - x\right)\left(A(x) + A_{j-1}\right) \tag{14.32}$$

где *V(x)* – объём атриума (м^3) над высотой *x.*

Высота дымового слоя над полом – значение *x*, которое удовлетворяет уравнению:

$$V_2 - V(x) = 0 \tag{14.33}$$

Значение *x*, которое удовлетворяет уравнению (14.33), можно определить любым из целого ряда способов нахождения корня. В программе AZONE использовался метод *заключения в скобки и деления пополам*.

Высота дымового слоя над поверхностью топлива равна:

$$z_2 = x - H_{fuel} . \tag{14.34}$$

Временной интервал

Чтобы свести ошибки к минимуму, необходимо выбрать интервал времени, Δt (не следует путать временной интервал с интервалом вывода данных, расчёты производятся в каждом интервале времени, но данные записываются только в интервалах вывода данных). Теоретически, ошибки, связанные с величиной интервала возникают по причине погрешности чисел, использованных в предшествующих интервалах. В программе AZONE значения T_{s1} , M_1 , и E_1 рассчитываются по предшествующему интервалу, а значения скорости выделения тепла и потока вытяжного воздуха оцениваются на определённый момент интервала. При расчётах, осуществляемых с использованием последовательно уменьшающихся интервалов, абсолютные значения подобных теоретических ошибок тоже уменьшаются.

Помимо теоретических ошибок с величиной интервала могут быть связаны погрешности округления. Природа числовых погрешностей округления такова, что прогнозы, сделанные для очень маленьких интервалов, могут содержать очень большие ошибки. В связи с этим необходимо подобрать такой временной интервал, который не будет ни слишком большим, ни слишком маленьким.

В таблице 14.2 перечислены погрешности расчётов задымления по нескольким значениям Δt в атриумах разных размеров: (1) малый, (2) малый вытянутый, (3) большой, и (4) большой вытянутый. Эти погрешности относятся к высоте дымового слоя, а погрешности в температуре дымового слоя (не отражены в таблице) были меньше. Для интервалов времени, которые были использованы, погрешностей округления, вызванных иленькой величиной интервала, не возникло.

Самая большая погрешность, указанная в таблице 14.2, составила 65% для стационарного пожара в малом атриуме, что свидетельствует о том, что эти погрешности могут быть настолько большими, что результаты моделирования теряют смысл. Желательно подобрать такой интервал, при котором погрешности приемлемы для всех атриумов, которые могут подлежать анализу. Интервал в 0,05 с. приводит к погрешностям менее 0,05% для атриумов всех категорий, за исключением малых атриумов.

В малых атриумах этот интервал приводит к погрешностям в 0,1% при квадратичном пожаре и в 0,2% при стационарном пожаре. Таким образом, интервал в 0,05 с. был выбран в качестве временно́го интервала для программы AZONE.

Таблица 14.2 Влияние интервала времени на точность моделирования с помощью программы AZONE[1]

Высота атриума, *H*	Площадь поперечного сечения, *A*	Интервал времени	Стационарный пожар[2]		Быстрый квадратичный пожар [3]	
		Δt	Время моделирования	Погрешность[4]	Время моделирования	Погрешность[4]
м	м^2	с	с	%	с	%
Малый атриум						
9,14	93	0,005	30	0,0	90	0,0
		0,01	30	0,0	90	0,0
		0,05	30	0,2	90	0,1
		0,20	30	1,2	90	0,2
		0,50	30	3,7	90	0,6
		1,00	30	7,7	90	1,2
		5,00	30	65,0	90	6,1
Малый вытянутый атриум						
9,14	1 110	0,01	240	0,0	300	0,0
		0,05	240	0,0	300	0,0
		0,20	240	0,1	300	0,1
		0,50	240	0,1	300	0,1
		1,00	240	0,3	300	0,3
		5,00	240	1,5	300	1,5
		20,00	240	6,3	300	6,4
Большой атриум						
45,7	2 320	0,01	480	0,0	300	0,0
		0,05	480	0,0	300	0,0
		0,20	480	0,0	300	0,1
		0,50	480	0,1	300	0,1
		1,00	480	0,3	300	0,3
		5,00	480	1,4	300	1,4
		20,00	480	6,0	300	5,8
Большой вытянутый атриум						
44,7	27 900	0,01	1 200	0,0	600	0,0
		0,05	1 200	0,0	600	0,0
		0,20	1 200	0,0	600	0,0
		0,50	1 200	0,0	600	0,0
		1,00	1 200	0,0	600	0,0
		5,00	1 200	0,1	600	0,2
		20,00	1 200	0,2	600	0,7

1. Условия моделирования: (1) температура окружающей среды равна 21°C; (2) постоянное поперечное сечение; (3) удаление дыма отсутствует; (4) поверхность топлива на уровне пола; (5) доля теплопередачи стенам равна 0,3.
2. Стационарный пожар мощностью 5 275 кВт.
3. При квадратичном пожаре время развития составляло 150 с.
4. Погрешность δ - погрешность высоты дымового слоя, *z,* вычисленная по уравнению: δ = 100 (z_m–z)/z, где z_m – значение *z* при наименьшем временно́м интервале для атриума соответствующего размера.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ

Когда традиционные методы анализа неприемлемы, одним из возможных вариантов является исследование пожара на примере модели меньшего масштаба. Накоплен большой опыт по применению физического моделирования в сфере противопожарных технологий. Такое масштабное моделирование используется для воссоздания картины пожара в целях проведения расследований. Два примера подобных реконструкций пожаров – это пожар на станции метро Кингз Кросс в Лондоне, Великобритания (Moodie et al., 1988 [25]), и пожар в торговом центре Харт Элбин (Quintiere and Dillon, 1997 [26]).

Моделирование по Фруду является, вероятно, самым распространённым видом физического моделирования, применяемого для изучения распространения дыма. В стандарте NFPA 92B [4] моделирование по Фруду признано одним из методов анализа систем противодымной защиты атриумов. В данном разделе рассматриваются основы физического моделирования движения дыма, и особое внимание уделяется моделированию по Фруду.

Анализ размерностей и теория подобия

Сутью анализа размерностей является выражение сложного процесса посредством относительно небольшого числа безразмерных переменных. Это упрощает анализ и делает физическое моделирование возможным. Многие безразмерные параметры можно рассматривать как соотношения сил, действующих на жидкости или газы. Три безразмерных параметра, представляющих особый интерес в рамках данной главы – это число Рейнольдса, число Фруда и число Прандтля.

Под числом Рейнольдса подразумевается отношение сил инерции к силам вязкости, и это число помогает определить переход от ламинарного течения к турбулентному. Число Рейнольдса выражается следующим образом:

$$R_e = \frac{lU\rho}{\mu} \tag{15.1}$$

где

R_e = число Рейнольдса,

l = длина,

U = скорость,

ρ = плотность, и

μ = динамическая вязкость.

Данное уравнение немного отличается от уравнения числа Рейнольдса, приводимого в других источниках, в которых число Рейнольдса выражено через кинематическую вязкость, ν, где $\nu = \mu / \rho$. Большинство уравнений, приведённых в разделе «Физическое моделирование пожаров», предназначены для описания физического моделирования, а не для осуществления расчётов. В связи с этим, единицы измерения для переменных не указаны в большинстве уравнений данной главы. Тем не менее, во всех этих уравнениях могут использоваться единицы измерения системы СИ или любой другой системы однородных единиц.

Под числом Фруда подразумевается соотношение между силами инерции и гравитационными силами. Поскольку плавучесть горячего дыма есть гравитационная сила, число Фруда является очень важным в физическом моделировании движения дыма. Число Фруда* равно:

$$F_r = \frac{U^2}{gl} \tag{15.2}$$

где

F_r = число Фруда,

g = ускорение силы тяжести, и

U = скорость.

Число Прандтля – безразмерное число, являющееся сочетанием следующих свойств жидкостей/газов:

$$P_r = \frac{\mu C_p}{k} \tag{15.3}$$

где

P_r = число Прандтля,

C_p = удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении,

μ = динамическая вязкость, и

k = коэффициент теплопроводности.

* Другой вариант числа Фруда: $F_r = U/(gl)^{1/2}$. Это просто квадратный корень из числа Фруда, используемого в книге Дж. Клоута и Дж. Милке «Принципы противодымной защиты» [6], а основные концепции, касающиеся числа Фруда и соотношений подобия для моделирования Фруда одинаковы независимо от того, какой вариант числа Фруда используется.

Формулы размерности

За систему основных (или базовых) размерностей можно принять длину *L,* время *t,* температуру *T* и массу *M.* Формула размерности физической величины происходит из определений или физических законов. Например, формула размерности ширины дверного проёма есть *[L],* исходя из определения. Квадратные скобки [ ] указывают на то, что величина имеет формулу размерности внутри скобок. Формула размерности скорости – *[L/t],* а ускорения – $[L/t^2]$.

В системе однородных единиц Второй закон Ньютона выглядит так:

$$F = ma \tag{15.4}$$

где
F = сила,
m = масса, и
a = ускорение.

Формула размерности силы равна формуле размерности массы, умноженной на ускорение, т.е. $[ML/t^2]$. Работа есть сила на перемещение, т.е. единица работы – это $[ML^2/t^2]$. Формулы размерности некоторых физических величин приведены в таблице 15.1.

Безразмерная величина не имеет размерности: например, размерность числа Фруда может быть выражена таким образом:

$$F_r = \frac{U^2}{gl};$$

$$\text{единицы: } \frac{(L/t)^2}{(L/t^2)L} = нет \tag{15.5}$$

Таблица 15-1: Величины и соответствующие формулы размерности

Величина	Обозначение	Формула размерности
Длина	*L, x, Z*	*L*
Время	*t*	*t*
Масса	*m*	*M*
Температура	*T*	*T*
Сила	*F*	ML/t^2
Теплота	*Q*	ML^2/t^2
Скорость	*U*	*L/t*
Ускорение	*a*	L/t^2
Работа	*W*	ML^2/t^2
Давление	p	M/t^2L
Плотность	ρ	M/L^3
Внутренняя энергия	*e*	L^2/t^2
Энтальпия	*h*	L^2/t^2
Удельная теплоёмкость твёрдого тела	*C*	L^2/t^2T
Удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении	C_p	L^2/t^2T
Удельная теплоёмкость среды при постоянном объёме	C_v	L^2/t^2T
Динамическая вязкость	μ	*M/Lt*
Кинематическая вязкость	$\nu = \mu/\rho$	L^2/t
Теплопроводность	*k*	ML/t^2T

Подобным образом могут быть выражены и другие безразмерные величины.

Пи-теорема

Согласно Пи-теореме, для любого физического приложения или процесса, включающего в себя *n* величин, использующих *m* размерностей, величины могут быть скомпонованы в *n* – *m* независимых безразмерных параметров. Более того, существует некоторая функциональная зависимость этих *n* – *m* независимых безразмерных параметров, которая описывает физическое приложение или процесс.

Рассмотрим приложение, при котором $A_1, A_2, A_3, \ldots, A_n$ являются определяющими величинами, такими как длина, скорость, давление, масса и т.п. Через функциональную зависимость этих величин можно описать приложение:

$$F(A_1,A_2,A_3,\ldots, A_n) = 0 \tag{15.6}$$

Величины A_1, A_2. A_3,, ... A_n можно скомпоновать по безразмерным группам или параметрам $\Pi_1,\Pi_2,\Pi_{3\ldots},\Pi_{n-m}$. Через функциональную зависимость этих Π-групп также можно описать приложение:

$$f\left(\Pi_1,\Pi_2,\Pi_{3\ldots},\Pi_{n-m}\right)=0. \tag{15.7}$$

Преимущество использования Π-групп заключается в том, что число независимых переменных сокращается от m до $n - m$. Для конкретного приложения некоторые из Π-групп могут иметь постоянное значение.

Алгебраический метод определения Π-групп, основанный на Пи-теореме, описан рядом авторов, однако, недостаток данного метода заключается в том, что не существует одного единственного решения для Π-групп, в связи с чем может возникнуть необходимость оценить ряд возможных комбинаций Π-групп.

Подобие

Физическое моделирование применяется во многих областях инженерного дела, таких как: испытания летательных аппаратов в аэродинамической трубе, исследования течений в реках и перемещения дыма в зданиях. Основной принцип заключается в том, что создаётся масштабная модель объекта-оригинала, и задаются такие условия испытаний, при которых сохраняются Π-группы. Это означает, что в определённом месте в модели каждая Π-группа имеет такое же значение, как и в соответствующем месте в объекте-оригинале.

Для полного подобия необходимо сохранение всех Π-групп. К счастью, полное подобие не всегда необходимо. Полезных результатов можно достичь и при сохранении нескольких Π-групп при условии, что влияние остальных Π -групп не является важным. Подробнее об этом будет написано далее.

Создание безразмерных групп

Альтернативой создания Π-групп с использованием Пи-теоремы является подход на основе дифференциальных уравнений. Он более изящен и приводит к более высокому уровню понимания. Кроме того, подход на основе дифференциальных уравнений может использоваться для создания Π-групп для физического моделирования движения дыма в целом, а затем эти группы можно вычислить для конкретных подходов моделирования.

Для создания интересующих нас безразмерных групп, перечисленные ниже основные уравнения гидроаэродинамики представлены в линейном виде.

Сохранение массы:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}=0 \tag{15.8}$$

Сохранение импульса в вертикальном направлении:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}\right)=-\frac{\partial p'}{\partial x}+g(\rho_\circ-\rho)+\frac{4}{3}\mu\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{15.9}$$

где

$$p' = p - p_o \tag{15.10}$$

и

$$\frac{dp_o}{dx}=-\rho_o g. \tag{15.11}$$

где

ρ_o - распределение давления окружающей среды.

Сохранение энергии:

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}\right)=k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}-4\kappa\sigma T^4+\int_0^{4\pi}\kappa I d\varpi+\dot{Q}'''+\frac{\partial p}{\partial t} \tag{15.12}$$

Состояние:

Уравнение состояния идеального газа:

$$p=\rho RT \tag{15.13}$$

В приведённых выше основных уравнениях используются следующие переменные:

C_p = удельная теплоёмкость,

g = ускорение силы тяжести,
k = коэффициент теплопроводности,
T = температура,
p = давление,
p_0 = давление окружающей среды,
u = x-составляющая скорости,
x = положение (координаты),
$\dot{Q}'''$ = выделение теплоты химической реакции на единицу объёма,
ρ_o = плотность окружающей среды,
I = интенсивность излучения,
κ = коэффициент поглощения,
σ = постоянная Стефана-Больцмана,
μ = динамическая вязкость.

Для идеального газа газовая постоянная, R, составляет:

$$R = C_p - C_v \tag{15.14}$$

где
C_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме.

Безразмерные переменные представлены ниже.

$$\hat{x} = \frac{x}{l} \tag{15.15}$$

$$\hat{u} = \frac{u}{U} \tag{15.16}$$

$$\hat{p} = \frac{p}{p_*} \tag{15.17}$$

$$\hat{p}' = \frac{p'}{p_*} \tag{15.18}$$

$$\hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_o} \tag{15.19}$$

$$\hat{T} = \frac{T}{T_o} \tag{15.20}$$

$$\hat{t} = \frac{t}{\tau} \tag{15.21}$$

$$\hat{Q} = \frac{Q'''l}{\rho_o V C_p T_o} \tag{15.22}$$

$$\hat{I} = \frac{I}{\sigma T_o^4} \tag{15.23}$$

где
l = характерный размер,
U = характеристическая скорость,
τ = характеристическое время,
T_0 = температура окружающей среды,
p_0 = давление окружающей среды,
ρ_o = плотность среды,
P_* = отклонение характеристического давления ($p_* = \rho_0 U^2$).

Подставив безразмерные переменные уравнений с (15.15) по (15.23) в основные уравнения, получаем следующие безразмерные основные уравнения:

Масса:

$$\Pi_1 \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial(\hat{\rho}\hat{u})}{\partial \hat{x}} = 0 \tag{15.24}$$

Импульс:

$$\hat{\rho}\left(\Pi_1 \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + \hat{u}\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}}\right) = -\Pi_2 \frac{\partial \hat{p}'}{\partial \hat{x}} + \frac{1}{\Pi_3}(1-\hat{\rho}) + \frac{4}{3\Pi_4}\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} \tag{15.25}$$

Энергия:

$$\hat{\rho}\left(\Pi_1 \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{u}\frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}}\right) = \frac{1}{\Pi_3\Pi_5}\frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{x}^2} + \Pi_3\Pi_5\Pi_6\Pi_7\left(\int_0^{4\pi} \hat{I}d\varpi - 4\hat{T}^4\right) + \hat{Q} + \Pi_8 \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} \tag{15. 26}$$

Состояние:

$$\hat{p} = \left(\frac{\Pi_9 - 1}{\Pi_8\Pi_9}\right)\hat{\rho}\hat{T} \tag{15.27}$$

Первая Π-группа:

$$\Pi_1 = \frac{l}{U\tau} \tag{15.28}$$

где характеристическое время, τ, представлено как *l/U.* Это означает, что Π_1= 1. Поскольку эта Π-группа – константа, она всегда сохраняется, и её можно не учитывать.

Вторая Π-группа:

$$\Pi_2 = \frac{p_*}{\rho_o U^2} \tag{15.29}$$

где p_* - отклонение характеристического давления *($p_* = p_0U^2$)*. Подставив это выражение p_* в уравнение (15.29), получаем Π_2= 1, т.е. эту Π-группу тоже можно не учитывать.

Третья Π-группа:

$$\Pi_3 = \frac{U^2}{gl}. \tag{15.30}$$

Π_4 **-** число Фруда. Как указано выше, под числом Фруда подразумевается соотношение между силой инерции и силами плавучести.

Четвёртая Π-группа:

$$\Pi_4 = \frac{lU\rho_o}{\mu}. \tag{15.31}$$

Π_4 - число Рейнольдса.

Пятая Π-группа:

$$\Pi_5 = \frac{\mu C_p}{k}. \tag{15.32}$$

Π_5 - число Прандтля. Для многих газов, включая воздух, число Прандтля почти всегда постоянно по отношению к температуре. Дым – это воздух с примесью относительно небольшого количества продуктов сгорания, и принято считать, что дым имеет те же свойства, что и воздух. Таким образом, Π_5 можно не учитывать при моделировании, выполняемом в воздухе.

Следующие три Π-группы имеют отношение к теплопередаче:

$$\Pi_6 = \kappa l, \tag{15.33}$$

$$\Pi_7 = \frac{\sigma T_o^3 l}{k}, \tag{15.34}$$

и

$$\Pi_8 = \frac{l p_*}{\rho_o C_p U T_o \tau}. \tag{15.35}$$

Последняя Π-группа:

$$\Pi_9 = \frac{C_p}{C_v}. \tag{15.36}$$

Π_9 - широко используемое соотношение удельных теплоёмкостей, и для идеальных газов это соотношение постоянно. Для воздуха соотношение удельных теплоёмкостей почти всегда имеет постоянное значение 1,4. Таким образом, Π_9 можно не учитывать при моделировании, выполняемом в воздухе.

Виды моделирования

Моделирование по Фруду, моделирование с использованием солёной воды и моделирование давления применяются для моделирования движения дыма в прикладных программах. Каждый из этих видов моделирования имеет далеко не полное подобие в том смысле, что ни один из практических подходов не может сохранить все Π-группы. Тем не менее, эти подходы к моделированию принесли хорошие качественные результаты и помогли лучше понять такое явление как движение дыма.

Моделирование по Фруду

Как описано выше, моделирование по Фруду является, вероятно, наиболее распространённым подходом к физическому моделированию движения дыма. Создаётся масштабная модель комнаты, атриума или иного сооружения. В модели проводятся испытания в воздухе при нормальных атмосферных условиях. Соотношения подобия используются, чтобы определить величину расчётного пожара и всех принудительных потоков воздуха, а также чтобы перенести измерения с модели на объект-оригинал. Более подробно эти соотношения подобия мы обсудим далее.

Поскольку плавучесть есть гравитационная сила, и она оказывает решающее влияние на поток, возникающий при пожарах, число Фруда (Π_3) должно быть сохранено. По причинам, описанным выше, также сохраняются Π_1, Π_2, Π_5 и Π_9.

Если размер модели подобран должным образом, поток становится полностью турбулентным, и эффекты вязкости на твёрдых поверхностях пренебрежимо малы. В связи с этим число Рейнольдса (Π_4) можно не учитывать. Информация по определению величины модели с целью сведения эффектов вязкости к минимуму, чтобы можно было не учитывать число Рейнольдса, приводится далее.

При моделировании по Фруду температуры в модели такие же, что и в соответствующих местах объекта-оригинала. Поскольку температуры в обоих случаях одинаковы, то и теплопередача примерно одинакова. Тем не менее, группы теплопередачи (Π_6, Π_7,Π_8) не сохраняются. Температура дыма вдали от пламени достаточно низкая, поэтому нет необходимости сохранять группы теплопередачи. Однако, для газов высокой температуры, таких как газы пламени, данные группы нельзя не учитывать.

Накоплен значительный опыт по применению моделирования по Фруду. Сравнение температур в объекте-оригинале и в модели масштаба 1:7 (рис.15.1), произведённое Квинтьером, МакКэффри и Кашиваги (Quintiere, McCaffrey and Kashiwagi, 1978 [27]), демонстрирует степень ожидаемого соответствия. Чоу и Ло (Chow and Lo, 1995 [28]) использовали моделирование по Фруду для моделирования движения дыма в атриуме и заполнения атриума дымом.

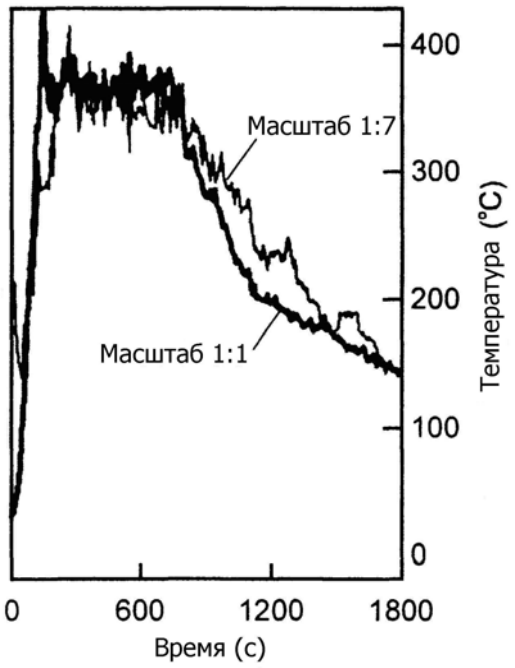


Рис. 15.1 Моделирование по Фруду: сравнение температуры газа в коридоре (адаптировано на основе Quintiere, McCaffrey and Kashiwagi, 1978 [27])

Моделирование с использованием солёной воды

Использование одной жидкости (или газа) для моделирования течения другой жидкости (или газа) называется аналоговым моделированием. Моделирование с использованием солёной воды широко применяется для моделирования движения дыма. Принцип моделирования с использованием солёной воды заключается в том, что масштабную модель погружают в резервуар с пресной водой и добавляют солёную воду, чтобы смоделировать тепловой источник. Поскольку солёная вода имеет более высокую плотность, чем пресная, она имеет тенденцию стекать вниз. Дым же обычно поднимается кверху. С учётом этого модель переворачивают в резервуаре вверх дном.

Часто модель создаётся из прозрачного полимера, а солёная вода подкрашивается в голубой цвет. Это помогает увидеть, сфотографировать или заснять на видео поток солёной воды. Основное преимущество моделирования с помощью солёной воды состоит именно в том, что оно помогает визуализировать дымовой поток.

Моделирование с помощью солёной воды похоже на моделирование по Фруду в том, что число Фруда сохраняется. Концентрация соли регулируется таким образом, чтобы плотность солёной воды в модели соответствовала плотности дыма в объекте-оригинале. В моделировании с помощью солёной воды отсутствует теплопередача, но в процессе заполнения модели солёная вода смешивается с пресной водой. Поскольку теплопередача отсутствует, использование моделирования с помощью солёной воды неприемлемо для моделирования потока пламени или потока рядом с пламенем.

Чоу и Сю (Chow and Siu, 1993 [29]) провели эксперименты по визуализации заполнения дымом нескольких атриумов на основе моделирования с помощью солёной воды. Йий (Yii, 1998 [30]) провёл серию экспериментов по моделированию растекающихся балконных струй с помощью солёной воды.

Моделирование давления

Информация о моделировании давления приводится здесь для полноты картины. При этом моделировании сохраняется как число Фруда, так и число Рейнольдса. Число Рейнольдса сохраняется посредством изменения давления окружающей среды. Давления можно представить следующим образом:

$$\frac{p_m}{p_f} = \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{-3/2} \tag{15.37}$$

где
p_m = давление в модели, Па;
p_f = давление в объекте-оригинале, Па;
l_m = длина в модели, м;
h = длина в объекте-оригинале, м.

Единицы, приведённые в уравнении (15.37), являются единицами, которые можно было бы употребить в данном случае, но это не единственный возможный вариант, при условии, что оба давления выражены в одних единицах, также как и обе длины. Например, давления могут быть выражены в атмосферах, а длины - в дюймах.

Модель в масштабе 1:8 будет необходимо испытать в резервуаре высокого давления под давлением около 23 атмосфер. Моделирование давления применяется крайне редко, вероятно, по причине того, что проведение испытаний в резервуаре высокого давления является дорогостоящим, а также того, что при моделировании по Фруду эффекты числа Рейнольдса могут быть сведены к минимуму. При моделировании давления, как и при моделировании по Фруду, группы теплопередачи не сохраняются.

Соотношения подобия при моделировании по Фруду

Основной принцип масштабной модели может быть выражен следующим образом:

$$x_m = x_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right) \tag{15.38}$$

где
x_m = положение (координаты) в модели, м;
x_f = положение (координаты) в объекте-оригинале, м;
l_m = длина в модели, м;
l_f = длина в объекте-оригинале, м.

Соотношение (l_m / l_f) – это масштаб модели. Например, для модели в масштабе 1:10 соотношение l_m / l_f = 1/10.

Как было описано выше, при моделировании по Фруду температуры в модели совпадают с температурами в соответствующих местах объекта-оригинала. Таким образом, соотношение подобия для температуры представлено как:

$$T_m = T_f \tag{15.39}$$

где
T_m = температура газа в модели, °C;
T_f = температура газа в объекте-оригинале, °C.

Поскольку модель и объект-оригинал имеют одинаковую температуру и давление, соотношение подобия для плотности составляет:

$$\rho_m = \rho_f \tag{15.40}$$

где
ρ_m = плотность газа в модели, кг/м^3 и
P_f = плотность газа в объекте-оригинале, кг/м^3.

Сохранение числа Фруда можно выразить следующим образом:

$$F_r = \frac{U_m^2}{g l_m} = \frac{U_f^2}{g l_f} \tag{15.41}$$

где
U_m = скорость в модели, м/с;
U_f = скорость в объекте-оригинале, м/с; и
g = ускорение силы тяжести, м/с^2.

Из уравнения (15.41) следует, что соотношение подобия для скорости составляет:

$$U_m = U_f \sqrt{\frac{l_m}{l_f}} \tag{15.42}$$

где
U_m = скорость в модели, м/с;
U_f = скорость в объекте-оригинале, м/с;
l_m = длина в модели, м; и
l_f = длина в объекте-оригинале, м.

Единицы, приведённые выше для переменных уравнения (15.42), являются единицами, которые можно было бы употребить в приложении, но это не единственный возможный вариант при условии, что единицы, в которых выражены U_m и U_f, совпадают, как и единицы, в которых выражены l_m и l_f. Например, обе скорости могут быть выражены в футах в минуту, а обе длины в дюймах. Все соотношения подобия, обсуждаемые в данном разделе, имеют схожую форму, и основная идея о возможности использования широкого спектра единиц также верна для всех остальных приведённых здесь соотношений подобия.

Объёмный расход есть скорость, умноженная на площадь, и соотношение можно представить в виде:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} \tag{15.43}$$

где

V_m = объёмный расход в модели, м^3/с;

V_f = объёмный расход в объекте-оригинале, м^3/с.

Массовый расход есть объёмный расход, умноженный на плотность. Совместив уравнения (15.40) и (15.43), получим:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} \tag{15.44}$$

где

$\dot{m}_m$ = массовый расход в модели, кг/с;

$\dot{m}_f$ = массовый расход в объекте-оригинале, кг/с.

Скорость есть длина за единицу времени. Подставив $U_m = l_m / t_m$ и $U_f = l_f / t_f$ в уравнение (15.43), получим:

$$t_m = t_f \sqrt{\frac{l_m}{l_f}} \tag{15.45}$$

где

t_m = время в модели, с;

t_f = время в объекте-оригинале, с.

Если представить конвективную составляющую теплоотдачи в качестве потоков энтальпии, $\dot{Q}_m = \dot{m}_m C_p \Delta T$ и $\dot{Q}_f = \dot{m}_f C_p \Delta T (\Delta T = \Delta T_m = \Delta T_f)$, уравнение (15.44) преобразуется в:

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} \tag{15.46}$$

где

$\dot{Q}_m$ = теплоотдача в модели, кВт;

$\dot{Q}_f$ = теплоотдача в объекте-оригинале, кВт.

Если конвективная доля пожара в модели, $\chi_{c,m}$, равна конвективной доле в объекте-оригинале, $\chi_{c,f}$, то соотношение подобия для конвективной теплоотдачи выглядит так:

$$\dot{Q}_{c,m} = \dot{Q}_{c,f} \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} \tag{15.47}$$

где

$\dot{Q}_{c,m}$ = конвективная теплоотдача в модели, кВт;

$\dot{Q}_{c,f}$ = конвективная теплоотдача в объекте-оригинале, кВт.

Перепад давления в связи со скоростью составляет: $\Delta p_m = \rho U^2_m / 2$ и $\Delta p_f = \rho U^2_f / 2$. Подставив это соотношение в уравнение (15.42), получаем (помните, что $\rho = \rho_m = \rho_f$):

$$\Delta p_m = \Delta p_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right) \tag{15.48}$$

где

Δp_m = перепад давления в модели, Па;

Δp_f = перепад давления в объекте-оригинале, Па.

Применение некоторых соотношений подобия проиллюстрировано в примерах 15.1 и 15.2. Цудзимото, Такэноу-чи и Уехара (Tsujimoto, Takenou-chi, and Uehara, 1990 [31]) провели эксперименты, подтвердившие корректность выше приведённых уравнений для движения дыма в атриумах. Квинтьер, МакКэффри и Кашиваги (Quintiere, McCaffrey and Kashiwagi, 1978 [27]) провели эксперименты по движению дыма, подтвердившие корректность применения этих соотношений подобия для моделирования перемещения дыма по коридору и внутри помещения.

Пример 15.1 Пожар в масштабе

Если мощность пожара в объекте-оригинале составляет 5280 кВт, какова мощность соответствующего пожара в модели масштаба 1:7?

Используя уравнение (15.46), получаем:

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_f \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} = 5280 \left(\frac{1}{7} \right)^{5/2} = 40{,}7 кВт$$

Пример 15.2 Преобразование данных о дымовом слое

В модели масштаба 1:8 уровень дымового слоя опускается до 0,533 м над уровнем пола через 42 с. после возгорания. Как эти данные соотносятся с объектом-оригиналом?

Преобразуем уравнение (15.45):

$$t_f = t_m \sqrt{\frac{l_f}{l_m}} = 42\sqrt{8} = 119 с.$$

Преобразуем уравнение (15.38):

$$x_f = x_m \left(\frac{l_f}{l_m} \right) = 0{,}533(8) = 4{,}27 м.$$

Это означает, что в объекте-оригинале через 119 с. уровень дымового слоя опустится до 4,27 м над уровнем пола.

Приблизительное масштабирование теплопередачи

Несмотря на то, что группы теплопередачи и число Рейнольдса не были сохранены, некоторые из эффектов теплопередачи могут быть частично сохранены путём учёта поверхностной теплопередачи и теплообмена между твёрдыми телами. Для полубесконечной поверхности к материалам стены и потолка можно применить следующее соотношение:

$$(k\rho C)_{w,m} = (k\rho C)_{w,f} \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{0,9} \qquad (15.49)$$

где

$(k\rho C)_{w,m}$ = тепловая инерция материалов стены или потолка модели, кВт^2 м$^{-4}$К$^{-2}$с;

$(k\rho C)_{w,f}$ = тепловая инерция материалов стены или потолка объекта-оригинала, кВт^2 м$^{-4}$К$^{-2}$с.

Тепловая инерция ($k\rho C$) некоторых материалов приведена в таблице. В примере 15.3 приведён расчёт термических свойств в масштабной модели. В этом примере уравнение (15.49) используется для пропорционального уменьшения тепловой инерции в модели до 0,44 кВт^{2}м$^{-4}$К$^{-2}$с. Тепловую инерцию достаточно масштабировать лишь приблизительно, и для этих целей подойдут материалы от бетона до гипсокартона.

Таблица А-11. Термические свойства материалов

Материал	Плотность ρ (кг/м^3)	Удельная теплоёмкость (кДж/кг К)	Теплопроводность k x 10^3 (кВт/м К)	$k\rho C$ кВт^2 м$^{-4}$ К$^{-2}$с
Алюминий (чистый)	2710	0,895	206	500
Сталь (0,5% углерод)	7850	0,465	54	197
Бетон	2400	0,75	1,6	2,9
Кирпич	2600	0,8	0,8	1,7
Стекло, плита	2710	0,8	0,76	1,6
Кирпичный/бетонный блок	1900	0,84	0,73	1,2
Гипсовая плита	960	1,1	0,17	0,18

Фанера	540	2,5	0,12	0,16
Плита волокнистой изоляции	240	1,25	0,53	0,16
ДСП	800	1,25	0,15	0,15
Газобетон	500	0,96	0,26	0,12
Гипсокартон	950	0,84	0,16	0,12
Панель из силиката кальция (Marinite XL)	700	1,12	0,11-0,14	0,086-0,11
Алюмосиликатный блок (Kaowool)	260	1	0,14	0,036
Стекловолоконная изоляция	60	0,8	0,037	0,036
Пенополистирол	20	1,5	0,034	0,0010

Пример 15.3 Масштабирование термических свойств

Стены и потолок объекта-оригинала выполнены из бетона. Пересчитайте значения термических свойств для модели в масштабе 1:8.

Согласно таблице, $k\rho C$ бетона составляет 2,9 кВт^2 м$^{-4}$ К$^{-2}$с. Используя уравнение (15.49), получаем:

$$(k\rho C)_{w,m} = (k\rho C)_{w,f}\left(\frac{l_m}{l_f}\right)^{0,9} = 2,9\left(\frac{1}{8}\right)^{0,9} = 0,44 кВт^2 м^{-4} К^{-2} с$$

Термические свойства достаточно масштабировать лишь приблизительно, и для этих целей подойдёт широкий спектр материалов.

Практические вопросы моделирования по Фруду

Предполагается, что масштабная модель должна создаваться таким образом, чтобы каждый из её размеров был полностью пропорционален соответствующим размерам объекта-оригинала, но при этом необязательно моделировать каждую мелкую деталь объекта-оригинала. Небольшие предметы, такие как электроарматура, выключатели, дверные ручки, декоративные элементы, детекторы дыма и спринклеры не должны повлиять на поток дыма в целом, и эти предметы можно не учитывать. При отсутствии хорошо разработанных критериев о размере таких небольших предметов, предлагается не учитывать предметы менее 0,23 м.

Как было указано выше, размер модели должен быть подобран правильно, так чтобы эффекты вязкости были ничтожно малы, и число Рейнольдса (Π_4) можно было бы не учитывать. Модель должна быть достаточно большой, чтобы поток был полностью турбулентным в тех местах, которые представляют интерес. Общее правило таково, что наименьшая длина, которая способна поддерживать такой турбулентный поток, составляет 0,3 м.

В следующем примере приводятся пояснения к выбору масштаба для модели. Предположим, что требуется правильно определить потоки, проходящие через проёмы из атриума в смежные помещения. Эти проёмы высотой - 2,4 м и шириной – 3,7 м. Будем считать, что эта высота есть наименьшее значение, где будет проходить полностью развитый поток. Тогда соответствующий проём в масштабной модели должен быть не менее 0,3 м. Таким образом, модель должна быть в масштабе 1:8. Масштаб для каждой ситуации моделирования должен определяться с учётом того, какие потоки важно смоделировать.

Поскольку некоторые из эффектов теплопередачи могут быть частично сохранены путём масштабирования тепловой инерции с использованием уравнения (15.49), достаточно осуществить лишь приблизительное масштабирование, как было описано выше. Чтобы была возможна визуализация дымового потока, некоторые стены делают из стекла.

Как указано выше, моделирование по Фруду приемлемо для температур вдали от пламени. Моделирование по Фруду подходит для моделирования движения дыма при пожаре в атриуме, где пламя не достигает потолка. Пламя, по-видимому, не будет смоделировано правильно, но ожидается, что потоки дыма вдали от пламени будут смоделированы реалистично.

Моделирование по Фруду также подходит для моделирования дымовых потоков в здании, возникающих при пожаре, полностью охватившем помещение. Из-за высоких температур моделирование неприемлемо для горящего помещения или любого пламени, вырывающегося из этого помещения, но ожидается, что моделирование дымового потока вдали от горящего помещения будет реалистичным.

NFPA 92B. РУКОВОДСТВО ПО СИСТЕМАМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ АТРИУМОВ, МОЛЛОВ И БОЛЬШИХ ПОМЕЩЕНИЙ

Информация в данной главе представлена на основе стандарта Национальной ассоциации по противопожарной защите (США) NFPA 92B «Руководство по системам противодымной защиты атриумов, торговых центров и больших помещений» [4].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Целью данного руководства является обеспечить заказчиков, проектировщиков, представителей надзорных органов и пожарных подразделений методикой противодымной защиты в больших, цельных (не поделенных на отсеки) помещениях. В руководстве представлена следующая информация:

(1) Вопросы перемещения дыма внутри помещения;
(2) Физические процессы, лежащие в основе перемещения дыма в помещениях;
(3) Методы противодымной защиты;
(4) Данные и технологии;
(5) Оборудование в здании и элементы управления;
(6) Методы проведения проверок, технического обслуживания и ремонта.

В данном руководстве представлена методология оценки нахождения дыма внутри большого помещения при пожаре в нём либо в прилегающем к нему помещении. Эти методы составляют техническую основу для помощи в проектировании, установке, проверке, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте новых и модернизированных систем противодымной защиты, установленных в зданиях с большими помещениями для защиты от дыма в помещении, где произошло возгорание, или между пространствами, не разделенными дымозащитными преградами. К зданиям, рассматриваемым в данном руководстве, относятся здания с атриумами, крытыми моллами и другими подобными большими помещениями. Данное руководство не предназначено для применения к складским, производственным или прочим аналогичным помещениям.

Алгебраические подходы к противодымной защите, содержащиеся в данном руководстве, предполагают, что дымоудаление будет производиться механическими средствами.

Целью данного руководства является предоставить рекомендации по системам противодымной защиты для обеспечения ими следующего:

(1) поддержание безопасных условий в путях эвакуации из зданий с большими помещениями в течение времени, требующегося на эвакуацию;
(2) контроль и снижение перемещения дыма между зоной пожара и смежными помещениями;
(3) обеспечение условий внутри и снаружи зоны пожара для помощи персоналу по борьбе с чрезвычайными ситуациями в проведении поисково-спасательных операций и обнаружении и контролировании распространения пожара;
(4) помощь в защите жизни людей и снижении ущерба имуществу;
(5) помощь в удалении дыма после пожара.

Принципы проектирования

Пожар в больших помещениях, моллах и атриумах

Предполагается, что дым, возникающий при пожаре в большом свободном пространстве, является плавучим, поднимающимся в виде струи над огнём и достигающим потолка либо претерпевающим стратификацию из-за температурной инверсии. После того, как дым достигнет потолка, или произойдёт его стратификация, пространство начнёт заполняться дымом, а граница дымового слоя опускаться. Скорость снижения границы дымового слоя зависит от скорости, с которой дым поступает в дымовой слой из дымовой струи. Такое заполнение дымом представлено в двухзонной модели, где есть чёткая граница между низом дымового слоя и окружающим воздухом. В инженерных целях скорость поступления дыма из струи в дымовой слой может быть определена как скорость вовлечения воздуха в струю под границей дымового слоя. Воздействие спринклеров может привести к снижению скорости выделения тепла и скорости вовлечения воздуха в струю.

Вследствие методологии зонного моделирования в модели используется допущение об однородности свойств (концентрации дыма и температуры) от границы дымового слоя до потолка и в горизонтальном направлении – сквозь весь дымовой слой.

Равновесное положение границы дымового слоя может быть достигнуто при удалении дыма при такой же скорости, с которой дым поступает в дымовой слой. Кроме того, дымоудаление может вызвать задержку в скорости опускания дымового слоя.

Там, где дымовой слой опустился до уровня прилегающих помещений, в которых есть люди, предотвращение перемещения дыма из атриума или молла в эти помещения может осуществляться с помощью физических преград или встречного воздушного потока. Встречный воздушный поток может использоваться для ограничения перемещения дыма в открытые прилегающие помещения, при этом воздух подаётся изнутри прилегающего помещения. Необходимый объёмный расход подаваемого воздуха, требующегося для достижения необходимой скорости, может быть значительным.

Чтобы работа вытяжных вентиляторов была эффективной, необходимо наличие приточного воздуха. Поступление приточного воздуха должно происходить с низкой скоростью. В целях эффективной противодымной защиты поток приточного воздуха должен быть достаточно рассеянным, чтобы не повлиять на пламя, дымовую струю или границу дымового слоя. Точки подачи приточного воздуха должны быть расположены под границей дымового слоя. Скорость потока приточного воздуха не должна превышать скорость дымоудаления, чтобы в атриуме или молле было достигнуто избыточное давление по сравнению с прилегающими помещениями. Если воздух поступает в дымовой слой над границей дымового слоя, это необходимо учитывать при расчёте дымоудаления.

Пожары в смежных помещениях

Пожары в смежных помещениях могут приводить к возникновению плавучих газов, растекающихся в большое помещение. В таком случае расчёт должен быть аналогичным расчёту пожара в большом помещении. Однако, расчёт должен учитывать разницу в вовлечении воздуха в основную и растекающуюся струи. Если смежные открытые помещения защищены автоматическими спринклерами, вычисления, приведённые в данном руководстве, могут показать, что дополнительная вентиляция не требуется. С другой стороны, независимо от того, работают спринклеры в смежных помещениях или нет, попадание дыма в большое помещение можно предотвратить, если дымоудаление в смежном помещении осуществляется со скоростью, при которой возникает достаточная скорость притока сквозь границу в большое пространство.

Системы пожаротушения

Системы автоматического пожаротушения проектируются для ограничения скорости горения массы топлива и, как следствие, ограничения возникновения дыма. При ограничении скорости горения массы снижается дымообразование. Пожары в помещениях со спринклерами, прилегающих к атриумам и пешеходным зонам крытых моллов, также могут быть эффективно ограничены с целью снизить воздействие на атриумные пространства или пешеходные зоны крытых моллов и, соответственно, повысить эффективность системы дымоудаления.

Задача функционирования автоматических спринклеров, установленных в соответствии с документом NFPA 13 «Стандарт по установке спринклерных систем» [38], состоит в обеспечении противопожарного контроля, который можно описать следующим образом: ограничение мощности пожара путём распределения воды таким образом, чтобы снизить скорость выделения тепла и смочить прилегающие горючие материалы, контролируя при этом температуру припотолочных газов с целью предотвращения разрушения конструкции. Было проведено небольшое число исследований, в ходе которых проводились полномасштабные пожарные испытания, при которых спринклерная система была подвергнута большой нагрузке, но обеспечила предполагаемый уровень функционирования. Эти исследования продемонстрировали, что в условиях противопожарной защиты скорость выделения тепла ограничивается, но образование дыма может продолжаться. Тем не менее, температура дыма уменьшается.

Полномасштабные пожарные испытания спринклерных систем проводились для офисов открытой планировки. Эти испытания показали, что при пожарах в помещениях со спринклерами после их активации и достижения ими контроля над огнём наблюдается экспоненциальный спад скорости выделения тепла. Результаты этих испытаний также указывают на то, что расчётный пожар с установившейся скоростью выделения тепла в 500 кВт даёт завышенную оценку для офисов открытой планировки со спринклерами.

Существуют ограниченные данные полномасштабных испытаний для определения мощности расчётного пожара для других типов помещений со спринклерами. Исследователи Ханселл и Морган предлагают завышенную оценку для конвективной теплоотдачи, основываясь на статистике пожаров в Соединённом Королевстве Великобритании и Северной Ирландии: 1 МВт для офиса со спринклерами, от 0,5 до 1,0 МВт для гостиничного номера со спринклерами и 5 МВт для торгового помещения со спринклерами. Эти стационарные расчётные пожары предполагают, что помещения оснащены спринклерами стандартного реагирования.

В Австралии были проведены полномасштабные испытания для торговых помещений. Эти испытания показали, что в некоторых распространённых типах торговых помещений (магазинах одежды и книжных магазинах) пожар регулируется и в итоге ликвидируется одним спринклером. Кроме того, эти испытания показали, что сложность при тушении пожара спринклерными системами может возникать в торговых помещениях с большой топливной нагрузкой, например, в магазинах игрушек.

Вероятность активации спринклеров зависит от многих факторов, включая скорость выделения тепла при пожаре и высоту потолка. Таким образом, при пожарах небольшой мощности срабатывание спринклеров с наибольшей вероятностью произойдёт в разумный срок в помещениях с более низкой высотой потолка, например, от 2,4 м до 7,6 м. Активация спринклеров в зоне пожара вызывает остывание дыма, что приводит к снижению его плавучести. Сниженная плавучесть может приводить к опусканию дыма и снижению видимости. Уравнения в разделе «Методы расчёта», иллюстрирующие заполнение дымом [(3) и (4)] и дымообразование [(8), (9) в данной главе и (13.17), (13.23) в главе «Принципы противодымной защиты атриумов»], не применяются, если произошла потеря плавучести при работе спринклеров.

На начальном активном этапе развития пожара при работе спринклеров дымовой слой остаётся стратифицированным под потолком. Около спринклеров дым затягивается каплями воды в холодный нижний слой и затем благодаря плавучести возвращается в дымовой слой. Как только спринклеры начинают функционировать на полную мощность и начинают тушить пожар, температура газов в дымовом слое быстро падает и дым рассеивается по всему объёму помещения, т.к. его плавучесть снижается.

Активация спринклеров в помещениях, прилегающих к атриуму, приводит к остыванию дыма. При пожарах с низкой скоростью выделения тепла температура дыма, вытекающего из отсека, приближена к температуре окружающей среды, и дым будет рассеян над высотой проёма. При пожарах с высокой скоростью выделения тепла температура дыма будет выше температуры окружающей среды, и дым, поступающий в атриум, является плавучим.

Температура дыма, образующегося при пожаре в помещении со спринклерами зависит от таких факторов, как скорость выделения тепла при пожаре, количество работающих спринклеров и плотность применения спринклеров. Полномасштабные пожарные испытания при температуре воды 10°C показывают, что при четырёх работающих спринклерах температура дыма снижается до уровня температуры окружающей среды или ниже, если скорость выделения тепла <200 кВт при плотности применения спринклеров 0,07 мм/с и <500 кВт при плотности применения спринклеров 0,14 мм/с. При более высоких значениях скорости выделения тепла температура дыма выше температуры окружающей среды, и дым, покидающий зону работы спринклеров, не теряет свою плавучесть.

При пожарах с низкой скоростью выделения тепла в помещениях со спринклерами дым разнороден по всей высоте помещения. Дымовой поток через большие проёмы в атриум имеет постоянную температуру в зависимости от высоты.

При более высоких значениях скорости выделения тепла формируется горячий верхний дымовой слой. Температура верхнего слоя будет находиться между температурой окружающей среды и рабочей температурой спринклера. Если температура дыма выше рабочей температуры спринклера, сработают другие спринклеры, и температура дыма понизится. В целях проектирования можно использовать допущение, что температура дыма равна рабочей температуре спринклеров.

Техническое состояние

Компоненты системы противодымной защиты должны быть пригодны к непрерывному использованию при максимальных ожидаемых температурах, рассчитанных с помощью методов, содержащихся в данном руководстве.

Анализ опасных факторов пожара

Когда проектирование систем противодымной защиты основано на поддержании безопасных условий в определённой части помещения, можно использовать один из двух подходов. Во-первых, расчёт может зависеть от предотвращения развития дымового слоя в этой части помещения. Во-вторых, расчёт может быть основан на сравнении свойств дымового слоя с пороговыми значениями опасности. Такое основание требует оценки влияния дыма на людей. Опасные факторы пожара, которые могут быть учтены, включают в себя, но не ограничиваются, следующим:

(1) температурное воздействие;
(2) токсичность дыма;
(3) видимость.

Расчёт эвакуации

Если проектирование систем противодымной защиты основано на учёте людей, выходящих из помещения до появления в нём дыма, либо до того, как достигнуты пороговые значения опасности, для этого помещения должен быть осуществлён расчёт времени эвакуации.

Критерии проектирования

Критерии проектирования должны быть основаны на понимании компетентными органами ожидаемых рабочих характеристик системы и процедур проведения приёмочных испытаний.

Зона утечки

Критерии проектирования и приёмочные испытания систем противодымной защиты должны быть основаны на следующих факторах с учётом зоны задымления и смежных зон:

(1) с маленькими отверстиями в дымозащитных преградах, такими как рабочие швы, щели, промежутки под закрытыми дверями и аналогичные зазоры, следует обращаться с позиции поддержания необходимой разницы давлений через дымозащитную преграду с избыточным давлением за пределами задымленной зоны;
(2) с большими отверстиями в дымозащитных преградах, таких как открытые двери и другие большие проёмы, можно обращаться с позиции поддержания необходимой скорости воздуха через проёмы с направленностью воздушного потока в зону возникновения пожара.

Данные о погоде

Разность температур внутри и снаружи здания приводит к эффекту тяги и определяет его направление и мощность. Эффект тяги должен учитываться при выборе дымовытяжных вентиляторов. Влияние температуры и скорость ветра изменяются в зависимости от высоты здания, конфигурации, утечки и проёмов и отверстий в конструкции стен и перекрытий.

В главе 26 «Информация о проектировании климатических систем» Руководства по основам проектирования, выпущенного Американским обществом инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха [32], предлагается использовать в качестве расчётных условий для зимнего и летнего периода сле-

дующие значения: 99,6% температуры нагрева по сухому термометру и 0,4% температуры охлаждения по сухому термометру, соответственно. Кроме того, в качестве расчётного условия рекомендуется использовать 1% предельной скорости ветра. По возможности, следует учитывать условия, характерные для конкретной местности.

Перепад давлений

Следует учитывать максимально и минимально допустимые перепады давлений на границах зон дымоудаления. Минимальная разность давлений должна быть такой, чтобы не происходило значительной утечки дыма в ходе эвакуации из здания. На рабочие характеристики системы влияют силы ветра, эффект тяги и плавучесть горячего дыма во время пожара.

ФАКТОРЫ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Основные факторы

Выбор разных задач и методов проектирования зависит от целей защиты, таких как защита путей эвакуации, содержание в исправном состоянии зон безопасности, обеспечение доступа пожарным подразделениям или защита имущества. Следует учитывать следующие факторы:

(1) высота, площадь поперечного сечения и площадь в плане большого помещения, защиту которого необходимо осуществить;
(2) типы и расположение помещений внутри большого помещения и смежных с ним;
(3) преграды (если имеются), отделяющие смежное помещение от большого помещения;
(4) пути эвакуации из большого помещения и любого из смежных помещений;
(5) зоны безопасности;
(6) расчётный пожар, используемый для вычисления дымообразования (см. подраздел «Предупреждение о минимальной мощности расчётного пожара»). Расчёт должен включать в себя тип, местонахождение и количество топлива, автоматическое пожаротушение и вентиляцию.

Методология проектирования

В задачи проектирования обычно входит противодымная защита внутри большого помещения и любых смежных с ним помещений. Источником дыма может быть как пожар в большом помещении, так и пожар в смежном помещении. Задачи проектирования включают в себя, к примеру, следующее:

(1) поддержание безопасных условий во всех путях, ведущих к выходу и к зонам безопасности, в течение времени, достаточном для того, чтобы люди, находящиеся в здании, добрались до выхода или зоны безопасности;
(2) поддержание границы дымового слоя на заранее установленной высоте;
(3) обеспечение возможности для пожарных подразделений приблизиться к огню, определить его местоположение и потушить пожар;
(4) ограничение повышения температуры дымового слоя, концентрации токсичных газов и снижения видимости.

Ограничения проектирования

Глубина заполнения дымом

Скорость снижения дымового слоя в большом помещении лишь в небольшой степени связана со скоростью выделения тепла при пожаре. Опускание дымового слоя, однако, в большой степени связано с высотой помещения и площадью его поперечного сечения. Необходим тщательный расчёт на основе приведенных в данном руководстве уравнений и методов в любой ситуации, где задачей является обеспечение противодымной защиты посредством использования объёма, в котором не происходит дымоудаление, такого как, например, коллектор дыма.

Минимальная расчётная глубина дымового слоя определяется как толщина (глубина) припотолочной струи и толщина, требующаяся для предотвращения «эффекта прокалывания». По этим причинам расчёт не должен быть основан на поддержании дымового слоя на уровне выше уровня припотолочной струи или выше уровня устранения «эффекта прокалывания» – того из уровней, который окажется ниже.

Толщина припотолочной струи составляет от 10 до 20% расстояния от огня до верха помещения.

Нарушение границы дымового слоя

Любой фактор, вызывающий увеличенную турбулентность в дымовом слое или увеличенный массовый приток в него или у его границы может повлиять на дымовой слой. Сюда относятся следующие факторы:

(1) работа автоматических спринклеров над границей дымового слоя может утягивать дым под границу дымового слоя;
(2) мощные воздушные потоки от систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха или элементов системы противодымной защиты, расположенных у границы дымового слоя, могут вызывать её нарушение, вызывая опускание дыма ниже границы;
(3) воздушные потоки скоростью более 61 м/мин, попадающие в восходящую дымовую струю под границей дымового слоя, могут вызывать отклонение струи и увеличение скорости вовлечения воздуха, что приводит к опусканию слоя ниже уровня, вычисленного на основе уравнений, приве-

дённых в данном руководстве. Необходимо рассчитать расположение пожарной нагрузки, потенциальную дымовую струю при такой пожарной нагрузке, размещение приточных отверстий и скорость у приточных отверстий в отношении расположения струи;

(4) направленные кверху воздушные потоки, расположенные под границей дымового слоя и обладающие достаточным импульсом, чтобы достичь его, могут приводить к тому, что турбулентное перемешивание вызовет нарушение границы дымового слоя и добавление массы к нему, приводя к его опусканию;

(5) воздух, нагнетаемый или вовлекаемый в верхний слой иным, чем со струей, способом, приведёт к повышению массы в верхнем слое, вызывая опускание слоя ниже расчётной глубины, если оно не будет скомпенсировано за счёт учета этого фактора при проектировании системы противодымной защиты.

Особые факторы, касающиеся естественной вентиляции

Способность подъёмных сил перемещать дым сквозь естественное вентиляционное отверстие является функцией как глубины, так и температуры горячего слоя. Массовый расход через вентиляционные отверстия под действием силы тяжести увеличивается с увеличением глубины и температуры слоя. Методика оценки массового расхода через вентиляционное отверстие описана в документе NFPA 204 «Руководство по противодымной и тепловой вентиляции» [40].

Как правило, естественная и механическая вентиляция несовместимы друг с другом в пределах одного воздушного объёма. Существует значительная вероятность блокировки естественной вентиляции за счёт возникновения обратной тяги, когда естественные вентиляционные отверстия становятся источником воздуха для механической вентиляции. Для проекта, в котором рассматривается подобное сочетание методов вентиляции, необходим тщательный технический анализ или физическое (масштабное) моделирование, чтобы удостовериться, что спроектированная система будет функционировать, как положено.

По каждому проекту, зависящему от естественных вентиляционных отверстий, необходимо рассчитать потенциальные ветровые условия, включая учёт влияния находящихся поблизости частей здания или других сооружений, которые могут приводить к возникновению тяги. Масса дыма лишь в незначительной степени связана со скоростью выделения тепла при пожаре, в то время как изменения в температуре дымового слоя практически напрямую связаны со скоростью выделения тепла. Следовательно, пожар, мощность которого значительно меньше расчётного пожара, приведёт к образованию только низкотемпературного дымового слоя с меньшим массовым расходом, чем при расчётном пожаре. Однако, для обеспечения вентиляции при менее мощном пожаре и расход также требуется меньший. На рис.2.3.3(a) представлена оценка эффективности массового расхода через вентиляционное отверстие, где температура воздуха внутри помещения равна температуре воздуха снаружи. График построен с сохранением всех параметров постоянными за исключением повышения температуры дымового слоя.

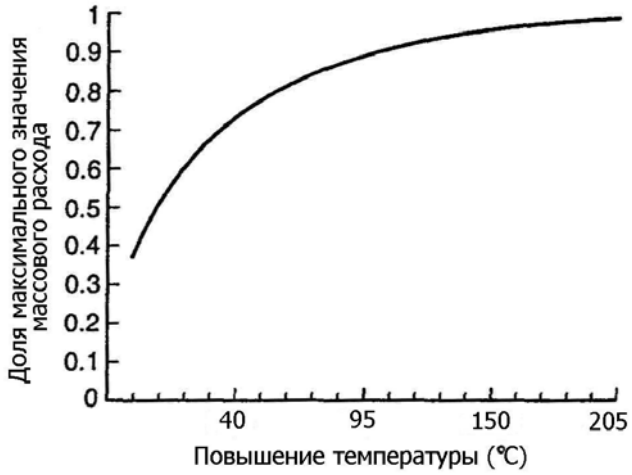


Рис. 2.3.3(a) Эффективность массового расхода через вентиляционное отверстие

Хотя на рис.2.3.3(a) показано существенное снижение эффективности естественного вентиляционного отверстия, при небольших пожарах приводящее к небольшому повышению температуры дымового слоя, при таких пожарах образуется и меньше дыма, а, следовательно, требуется меньше вентиляции. Джеймс Милке и Джон Клоут провели оценку влияния разной теплоотдачи при пожарах на площадь вентиляционного отверстия, необходимого для поддержания определённой чистой высоты. Данный расчёт показывает, что необходимая площадь вентиляционного отверстия относительно нечувствительна к теплоотдаче при пожаре.

На рис.2.3.3(b), взятом из проведенного Джеймсом Милке и Джоном Клоутом расчёта, отражены площади вентиляционных отверстий, необходимые для поддержания различных высот границы дымового слоя для заданных значений мощности пожаров и высоты потолков.

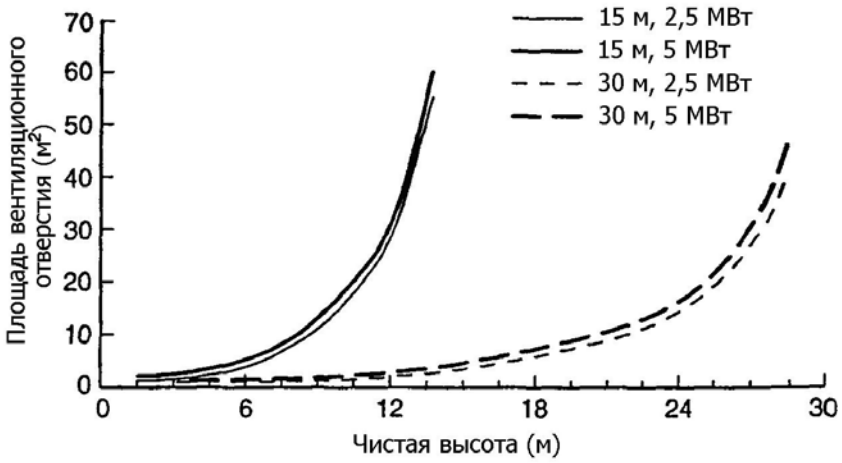


Рис.2.3.3(b) Площадь вентиляционных отверстий, необходимая для поддержания чистой высоты

Эффективность естественных вентиляционных отверстий может быть существенно снижена или сведена к нулю, если температура снаружи здания высока. Один из сценариев, требующих особого внимания, касается пожара, происходящего в помещении, когда температура внутри этого помещения ниже температуры снаружи здания (т.е. сочетание летних погодных условий с условиями в атриуме с кондиционированным воздухом). Хотя дым может быть плавучим относительно воздуха внутри помещения и подниматься к потолку, как только вентиляционное отверстие откроется, наружный воздух попадёт в здание, если температура воздуха снаружи здания выше температуры дымового слоя. В связи с этим дым удаляться не будет, и граница дымового слоя может опуститься.

Пример ограничений естественных вентиляционных отверстий из-за температуры снаружи здания приведён на рис.2.3.3(c). В этом примере предполагается, что температура снаружи составляет 38°C. Температура дымового слоя по отношению к чистой высоте определяется уравнением повышения температуры (ΔT) в верхнем слое при вентилируемом пожаре (см. таблицу 3.5) для трёх пожаров с разными скоростями выделения тепла. Если температура дымового слоя меньше температуры снаружи здания, дымоудаления не произойдёт. По этой причине естественная вентиляция не является целесообразным методом дымоудаления при пожаре мощностью 2,7 МВт, при котором планируемая чистая высота больше 18 м. Аналогичным образом чистые высоты более 24 м и 27 м не могут быть достигнуты с помощью естественной вентиляции при пожарах мощностью 5,3 МВт и 7,9 МВт.

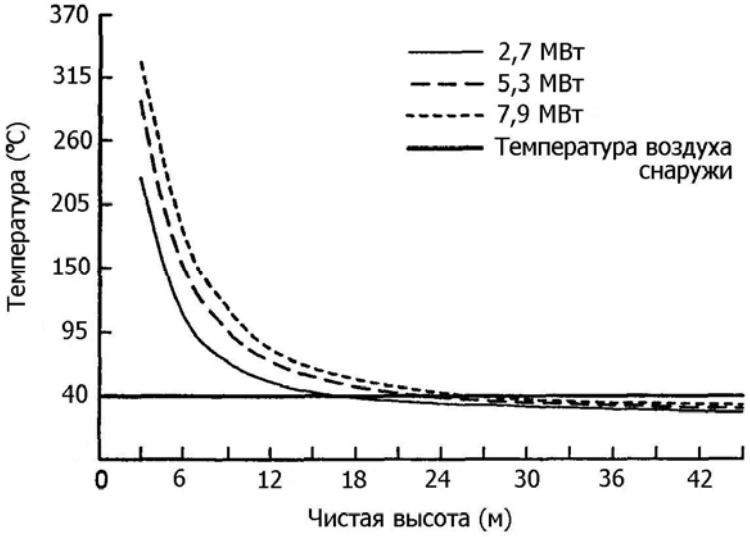


Рис.2.3.3(c) Ограничения естественных вентиляционных отверстий в зависимости от температуры воздуха снаружи

Подходы к проектированию (методология)

Проектные решения при проектировании противодымной защиты зависят от помещения, в котором должно быть организовано дымоудаление, и от помещения, в котором образуется дым, как описано ниже. Необходимо учитывать метод расчёта, если таковой имеется, для удаления дыма из помещения (механическое дымоудаление по отношению к естественной вентиляции) или для сдерживания дыма в пределах помещения (метод воздушного потока по отношению к методу подпора воздуха).

Противодымная защита в большом помещении

Существует ряд методов, подходящих для противодымной защиты при пожаре в большом помещении. В таблице 2.4.1 приведены основные моменты по каждому из методов, включающие в себя следующее:

(1) использование большого помещения в качестве резервуара дыма и моделирование опускания дымового слоя с целью определения, достигнет ли граница дымового слоя высоты, при которой люди, находящиеся в помещении, подвергнутся воздействию дыма до того, как смогут эвакуироваться;

(2) удаление дыма из большого помещения с использованием мощностей механической вентиляции, достаточных для поддержания границы дымового слоя в помещении на предварительно рассчитанной высоте на протяжении неопределенного периода времени;

(3) удаление дыма из большого помещения с использованием мощностей механической вентиляции, замедляющей скорость опускания дымового слоя на срок, позволяющий людям, находящимся в помещении, безопасно эвакуироваться из этого помещения;

(4) обеспечение естественной вентиляции, достаточной для поддержания границы дымового слоя в помещении на предварительно рассчитанной высоте на протяжении неопределённого периода времени;

(5) обеспечение естественной вентиляции, достаточной для снижения скорости опускания дымового слоя на срок, позволяющий людям, находящимся в помещении, безопасно эвакуироваться из этого помещения.

По каждому из подходов к проектированию, перечисленных в таблице 2.4.1, приведены только методы алгебраических вычислений. Также можно использовать масштабное моделирование, зонное моделирование или вычислительную гидродинамику, описанные в других частях данного документа.

Таблица 2.4.1 Методы противодымной защиты для больших помещений

Подход	Расчётный пожар	Алгебраические методы для расчёта перемещения дыма	Расчёт перемещения людей
Заполнение дымом в сопоставлении с расчётом времени эвакуации	Стационарный Нестационарный	Уравнение (3) Уравнение (4)	Обязателен
Механическое дымоудаление для достижения постоянной высоты дымового слоя*	Стационарный	Уравнения (8), (9), (13.17), (13.23)	Не обязателен
Механическое дымоудаление в сопоставлении с расчётом времени эвакуации	Стационарный Нестационарный	Уравнения (8), (9), (13.17), (13.23)	Обязателен
Естественная вентиляция с постоянной высотой дымового слоя*	Стационарный	См. руководство NFPA 204	Не обязателен
Естественная вентиляция в сопоставлении с расчётом времени эвакуации	Стационарный Нестационарный	См. руководство NFPA 204	Обязателен

*Нестационарный пожар не подходит для данного подхода, поскольку только стационарный пожар приводит к постоянной высоте дымового слоя.

Заполнение дымом в сопоставлении с расчётом времени эвакуации

Применение дымоудаления из большого помещения необязательно, если можно продемонстрировать, что эвакуация людей из помещения может быть осуществлена до того, как дымовой слой опустится до уровня, на котором люди подвергаются воздействию дыма. Опасное воздействие может проявляться в наличии дыма или опасных факторов, влияющих на людей, находящихся в помещении.

Уровень первых признаков дыма даёт заниженную оценку положения дымового слоя, как показано на рис. A.1.4.6, и рассчитано на основе полученных эмпирическим путем уравнений (3) и (4) в подразделе «Высота уровня первых признаков дыма в любой момент времени». Уравнение (3) применяется к стационарным пожарам, а уравнение (4) – к нестационарным, как описано в подразделе «Расчётный пожар». Уравнения (3) и (4) косвенным образом учитывают временно́е отставание, связанное с перемещением дыма от огня в верхний слой.

Уравнение (3) не может быть объединено с уравнением (4) для расчёта опускания дымового слоя при растущих пожарах со стационарным максимальным значением. Каждое из этих уравнений получено эмпирическим путем и не может быть использовано в сочетании со вторым уравнением. Расчёт опускания дымового слоя при растущих пожарах со стационарным максимальным значением следует выполнять способом, аналогичным тому, что описан в подразделе «Дымоудаление в сопоставлении с временны́м расчётом эвакуации».

Примечание.

Уровень первых признаков дыма (рис. А.1.4.6; также см. рис.14.3 в подразделе «Эмпирические уравнения по заполнению атриума дымом» в главе «Принципы противодымной защиты атриумов»).

Для оценки проекта с использованием физического моделирования или вычислительной гидродинамики требуется метод определения высоты границы дымового слоя и уровня первых признаков дыма с использованием ограниченного количества точечных измерений по высоте атриума. В основе одного из подходов лежит линейная интерполяция точечных измерений. Используя данные о температуре, можно определить высоту границ. Она будет соответствовать той высоте, на которой температура равна:

$$T_n = C_n\left(T_{\max} - T_b\right) + T_b$$

где

T_n – температура на высоте границы;

T_{max} – температура дымового слоя;

T_b – температура холодного нижнего слоя;

C_n – интерполяционная постоянная со значениями 0,1-0,2 для уровня первых признаков дыма и 0,8-0,9 для границы дымового слоя, соответственно.

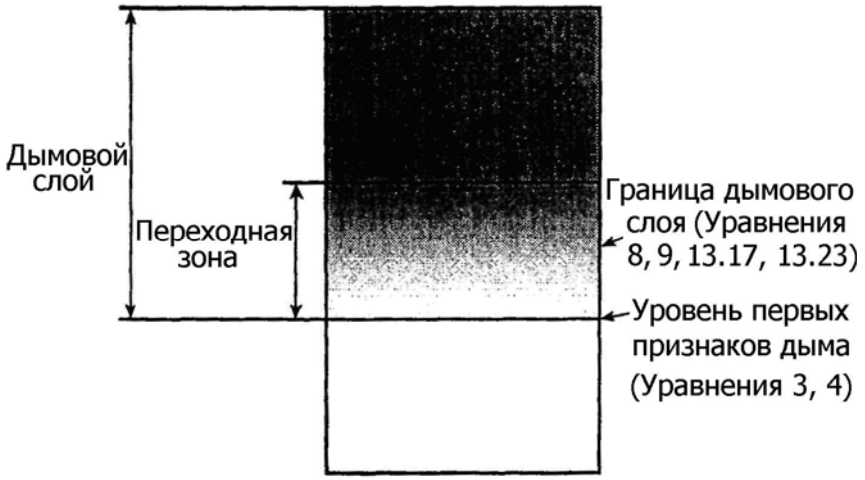


Рис. А.1.4.6 Граница дымового слоя

Дымоудаление с целью обеспечения постоянной высоты дымового слоя

Выполнять расчёт времени эвакуации не требуется, если можно продемонстрировать, что граница дымового слоя сохраняется на высоте, при которой люди, находящиеся в помещении, не подвергаются воздействию дыма на протяжении неограниченного срока. Постоянная высота дымового слоя достигается, если обеспечивается мощность дымоудаления равная объёму образования дыма на расчётной высоте границы дымового слоя. Иными словами, объём дыма, поступающего в дымовой слой, равен объёму дыма, удаляемому механической вентиляцией. Как правило, данный метод применим только к стационарным пожарам, за исключением случаев, когда известно максимальное значение дымообразования при нестационарном пожаре на протяжении расчётного периода работы системы противодымной защиты. Скорость дымообразования на заданной высоте границы дымового слоя может быть вычислена с помощью уравнений (8), (9), (13.17) и (13.23). Температуру дыма, поступающего в дымовой слой, вычисленную с помощью уравнений в таблице 3.5, необходимо учитывать при расчёте плотности дыма, используемой в уравнении (13.27).

Поскольку уравнения (8), (9), (13.17) и (13.23) ссылаются на высоту границы, соответствующую верхней границе переходной зоны, показанной на рис.А.1.4.6, необходимо выбрать такую расчётную высоту границы, при которой люди не будут подвержены воздействию дыма. При выборе этой расчётной высоты границы необходимо учитывать ожидаемую толщину переходной зоны.

Опасное воздействие может проявляться в наличии дыма или опасных факторов, влияющих на людей, находящихся в помещении.

Дымоудаление в сопоставлении с временны́м расчётом эвакуации

Дымоудаление может применяться для снижения скорости опускания дымового слоя на срок, позволяющий людям осуществить безопасную эвакуацию из помещения. Данный подход может использоваться в случаях, когда невозможно обеспечить мощность дымоудаления достаточную для поддержания дыма на расчётной высоте границы дымового слоя в течение неопределенного периода времени. Для расчёта положения дымового слоя за период времени необходимо провести анализ переходных процессов, который учитывает изменение в дымообразовании как функцию положения границы дымового слоя, а также дымоудаление, обеспечиваемое механической системой вентиляции. Данный подход подробно обсуждается в подразделе «Расчёт положения дымового слоя» раздела «Справочная информация». Уравнения (8), (9), (13.17) и (13.23) применяются для определения объёма дыма, поступающего в дымовой слой в заданный временной шаг. Указанное количество удаляемого механическим способом дыма затем удаляется из дымового слоя за такой же временной шаг. Затем рассчитывается новое положение слоя на конец временного шага. Температура дыма, входящего в дымовой слой, вычисленная на основе уравнений из таблицы 3.5, должна учитываться при расчёте плотности дыма, применяемой в уравнении (13.27). Временно́е отставание, связанное с перемещением

дыма от огня в верхний слой, может быть включено, а может и не быть включено в этот расчёт. Игнорирование временно́го отставания даёт завышенный объём дымоудаления, поскольку подразумевается, что дым немедленно попадает в верхний слой, что приводит к более быстрому опусканию дымового слоя. Временно́е отставание может быть существенным при рассмотрении пожаров в больших помещениях.

Поскольку уравнения (8), (9), (13.17) и (13.23) ссылаются на высоту границы, соответствующую верху переходной зоны, изображенной на рис.A.1.4.6, необходимо выбрать расчётную высоту границы, при которой люди не подвергнутся воздействию дыма. При выборе этой расчётной высоты границы необходимо учитывать ожидаемую толщину переходной зоны.

Опасное воздействие может проявляться в наличии дыма или опасных факторов, влияющих на людей, находящихся в помещении.

Естественная вентиляция с целью достижения постоянной высоты слоя

В некоторых случаях естественная вентиляция может использоваться для поддержания границы дымового слоя на заданной высоте в течение неограниченного срока. Это может быть осуществлено, если количество удаляемого дыма равно объёму дымообразования на расчётной высоте границы слоя. Объёмное дымоудаление, обеспечиваемое естественной вентиляцией, может быть рассчитано с использованием методов, описанных в документе NFPA 204 «Руководство по противодымной и тепловой вентиляции» [40].

Естественная вентиляция в сопоставлении с временны́м расчётом эвакуации

В некоторых случаях естественная вентиляция может применяться аналогичным указанному в подразделе «Дымоудаление в сопоставлении с временны́м расчетом эвакуации» способом, чтобы замедлить скорость опускания дымового слоя на срок, необходимый для безопасной эвакуации людей из помещения. Данный подход может использоваться, когда нет возможности обеспечить механическое дымоудаление или естественную вентиляцию достаточной мощности для поддержания дыма на высоте расчётной границы слоя в течение неопределенного срока. Для расчёта положения дымового слоя за период времени необходимо провести анализ переходных процессов, который учитывает изменение в дымообразовании как функцию положения границы дымового слоя, а также дымоудаление, обеспечиваемое естественной вентиляцией. Аналогичный подход для механического дымоудаления подробно обсуждается в подразделе «Расчёт положения дымового слоя» раздела «Справочная информация». Объёмное дымоудаление, обеспечиваемое естественной вентиляцией, может быть рассчитано с использованием методов, описанных в документе NFPA 204 «Руководство по противодымной и тепловой вентиляции» [40].

Защита от распространения дыма в смежные помещения

Дымозащита смежных помещений может осуществляться одним из следующих методов:

(1) поддержание границы дымового слоя на уровне выше уровня самого высокого проёма, ведущего в смежное пространство;
(2) установка дымозащитной преграды с целью ограничения распространения дыма в смежное помещение (Возможно, потребуется применить перепад давлений через дымозащитную преграду);
(3) обеспечение встречного воздушного потока на поверхности проёма для предотвращения распространения дыма в смежное пространство;
(4) помощь в пожаротушении с целью предотвратить развитие горячей дымовой струи.

Дымоудаление может обеспечиваться внутри большого помещения с целью ограничить глубину накопления дыма или увеличить время заполнения большого помещения дымом, чтобы граница дымового слоя оставалась над уровнем самого высокого проёма, ведущего в смежное помещение, на срок, необходимый для достижения задач проектирования.

Для ограничения распространения дыма в смежное помещение могут быть установлены дымозащитные преграды. В зависимости от количества отверстий в преграде может понадобиться применить метод перепада давлений к дымозащитной преграде. Этот метод описан в стандарте NFPA 92A «Рекомендуемые правила для систем дымоудаления» [39]. Перепада давлений можно достичь, удаляя дым из большого помещения так, чтобы в нём образовалось отрицательное давление по отношению к давлению в смежном помещении. Перепад давлений также может обеспечиваться путём подачи воздуха в смежное помещение.

Метод воздушного потока может использоваться для предотвращения перемещения дыма из большого помещения в смежные помещения для больших проёмов, когда метод подпора воздуха является непрактичным. При методе воздушного потока используется скорость в сечении всего проёма. В подразделе «Требования к встречному воздушному потоку» приведен метод расчёта необходимой минимальной скорости. Данный метод также применим для прилегающих помещений ниже границы дымового слоя с целью ограничения распространения дыма в эти помещения путём его поперечного распространения от пересекающихся струй. При использовании метода воздушного потока поток должен быть практически перпендикулярен плоскости проёма.

Противодымная защита внутри смежных помещений

Пожар в помещениях, окружающих большое помещение

Среди конфигураций соотношения между большим помещением и окружающими помещениями возможны следующие варианты:

(1) изолированное помещение;
(2) смежное помещение.

Пожар в изолированных помещениях

Когда конструкция, отделяющая большое помещение от окружающих его помещений достаточно прочная, чтобы перепад давлений между зоной пожара и зоной, где нет пожара, можно было контролировать, большое помещение можно рассматривать как одну из зон в зонной системе противодымной защиты.

Пожар в смежных помещениях

Смежные помещения могут быть спроектированы так, чтобы дым мог растекаться в большое помещение. В этот момент растекающийся в большое помещение дым должен регулироваться системой противодымной защиты, спроектированной с целью поддержания расчётной высоты границы дымового слоя. Смежные помещения могут также быть спроектированы таким образом, чтобы предотвратить перемещение дыма в большое помещение. Такой проект требует достаточного дымоудаления из смежного помещения, чтобы свести дымовой поток между ним и большим помещением к минимуму.

Дымоудаление через большое помещение. При пожарах в помещениях без спринклерных систем необходимо провести оценку скорости дымоудаления из большого помещения не только для свободной струи от огня в большом помещении, но и для струи, возникающей в смежном помещении. Система противодымной защиты должна быть способна регулировать одно из этих условий, но не оба одновременно. Методы расчёта объёмного дымообразования для растекающихся и оконных струй описаны в подразделах «Струи, проникающие с балкона» и «Оконные струи», соответственно. Уравнения в этих подразделах действительны только для пожаров в помещениях без спринклерных систем, поскольку они были выведены эмпирическим путём на основе данных, полученных в ходе испытаний. Когда дым попадает в большое пространство, существует вероятность того, что дым повернёт назад на верхние этажи или столкнется с нависающими потолками верхних этажей, и это необходимо учитывать. Существует вероятность того, что этот дым проникнет на верхние этажи смежных помещений, в связи с чем необходимо провести оценку опасности, которую дым может представлять для этих помещений.

Сдерживание дыма внутри смежных помещений. Смежные помещения также могут быть спроектированы таким образом, чтобы предотвращать перемещение дыма в большое помещение. Такой проект требует достаточного дымоудаления из смежного помещения, чтобы свести дымовой поток между ним и большим помещением к минимуму. Скорость через проём, при которой это достигается, описана в подразделе «Защита от распространения дыма в смежные помещения», а в разделе «Методы расчёта» представлены методы расчёта дымообразования в смежном пространстве. Количество удаленного дыма, требующееся в данной ситуации, может во многом превзойти мощность обычных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и потребовать установки специализированной системы противодымной защиты в смежном помещении.

Оценку размещения вытяжных вентиляционных отверстий следует проводить с большим вниманием. Впускные и выпускные отверстия вытяжной системы должны располагаться таким образом, чтобы перемещение дыма не затрудняло доступ к выходам. Выпускные отверстия для удаления дыма наружу должны размещаться дальше от впускных отверстий наружного воздуха для сведения к минимуму вероятности рециркуляции воздуха. Кроме того, между большим помещением и смежными помещениями могут быть установлены противодымные преграды. Если конструкция, отделяющая большое помещение от окружающих помещений, достаточно прочная, чтобы перепад давлений между зоной пожара и зонами, где нет пожара, можно было контролировать, большое помещение можно рассматривать как одну из зон в зонной системе противодымной защиты. Зонные системы дымоудаления описаны в стандарте NFPA 92A «Рекомендуемые правила для систем дымоудаления» [39].

Учет опасных факторов пожара при проектировании систем противодымной защиты

Проектные решения для систем противодымной защиты, описанные в подразделах «Дымоудаление через большое помещение» и «Сдерживание дыма внутри смежных помещений», основаны на задаче поддержания слоёв дыма на достаточных высотах на протяжении периода времени, достаточного для того, чтобы предотвратить воздействие дыма на людей, находящихся в помещении. В некоторых случаях системы дымоудаления могут быть спроектированы таким образом, что контакт людей с дымом допускается, при условии, что обеспечиваются основные безопасные условия. Опасные факторы пожара, которые могут учитываться при расчёте, включают в себя следующие:

(1) дальность видимости;
(2) токсичность дыма;
(3) температура дыма.

Определение степени токсичности дыма обычно включает в себя расчёт воздействия угарного газа (CO). Также может учитываться воздействие других токсичных газов в зависимости от вида топлива. Пороговые значения опасности, как в отношении токсичности дыма, так и в отношении температуры дыма, обычно определяется с учётом времени, в течение которого люди находятся под его воздействием.

Вычисления, имеющие отношение к определению дальности видимости, описаны в подразделе «Расчёт концентрации газов и снижения видимости при пожаре» раздела «Справочная информация».

Эксплуатация систем противодымной защиты

Системы противодымной защиты больших помещений предназначены для удержания дымового слоя в верхней части большого помещения или ограничения количества дыма, распространяющегося в зоны за пределами большого помещения. Для достижения этих целей необходимы следующие условия:

(1) раннее обнаружение пожара (до того как уровень дыма или скорость его опускания превысит задачи проектирования). Если целью системы противодымной защиты является помощь в обеспечении условий для безопасной эвакуации, необходимо учесть время реакции людей на пожар и время эвакуации;
(2) работу системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, обслуживающей большое помещение и смежные помещения, необходимо остановить, если она будет отрицательно влиять на систему противодымной защиты;
(3) дым должен удаляться из большого помещения над заданной границей дымового слоя;
(4) должно быть обеспечено достаточное количество свежего воздуха для компенсации удаляемого воздуха. Необходимо, чтобы приточное отверстие для подачи очищенного воздуха и вытяжное отверстие были отделены друг от друга так, чтобы удаляемый загрязнённый воздух не попадал в здание.

Автоматическая активация

При выборе типа детектора для использования с целью активации системы противодымной защиты необходимо учитывать конфигурацию большого помещения. Необходимо оценить размер, форму и высоту помещения. Эти факторы в значительной степени отличаются друг от друга в зависимости от проектов атриумов и должны внимательно учитываться при выборе детекторов для большого помещения. Кроме того, необходимо провести оценку ограждающих конструкций большого помещения на предмет их влияния на температурную стратификацию. Высота большого помещения и его архитектурные особенности, такие как верхний свет, являются основными факторами при определении стратификации.

Факторы окружающей среды, такие как конвекционные потоки и механическое перемещение воздуха, также необходимо учитывать при выборе типа и места расположения детектора. Рекомендации по выбору детекторов приведены в стандарте NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации» [3]. Автоматическая активация системы противодымной защиты может быть осуществлена следующими способами:

(1) детекторы дыма точечного типа;
(2) детекторы дыма лучевого типа;
(3) поток воды из автоматической спринклерной системы;
(4) другие подходящие детекторы;
(5) сочетание вышеприведённых способов.

Как правило, все устройства автоматического обнаружения пожара внутри большого помещения и смежных помещений должны активировать систему противодымной защиты. Исключение могут составлять детекторы для особых целей, например, повторный вызов лифта и механизм открывания двери, и для особых рисков, например, специальные системы пожаротушения. Чтобы избежать ненужной работы системы при активации детектором дыма, следует рассмотреть возможность активации системы двумя или более детекторами дыма или проверки сигнала тревоги.

Устройства автоматического обнаружения не должны быть напрямую подсоединены к системе противодымной защиты без дальнейшего учета вопросов целостности системы обнаружения пожара. Целостность системы обнаружения пожара рассматривается в стандарте NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации» [3].

Детекторы дыма точечного типа могут использоваться на низких потолках или рядом с низкими потолками больших помещений при условии, что детекторы доступны для технического обслуживания и размещены с учётом влияния стратификации и воздушных потоков, вызванных естественными и механическими силами.

Детекторы дыма лучевого типа могут использоваться на высоких потолках или рядом с ними в больших помещениях и располагаться таким образом, чтобы выпускать луч горизонтально или в других приемлемых направлениях. Стратификация и естественные или механические воздушные потоки могут привести к необходимости использования дополнительных лучей на промежуточных уровнях больших помещений, где из-за высоты потолков может происходить отставание в активации системы противодымной защиты.

Поток воды из автоматической спринклерной системы также следует использовать для активации системы противодымной защиты. Чтобы получить правильный отклик системы противодымной защиты, важно, чтобы спринклерная система была в одной и той же зоне, что и система обнаружения дыма в большом помещении. Чтобы установить время отклика системы противодымной защиты при её активации с помощью спринклеров, следует рассчитать высоту большого помещения и месторасположение спринклеров. Время активации с помощью спринклеров может быть слишком долгим, если спринклеры расположены в нескольких этажах над полом помещения, и в этом случае эффективной активации системы противодымной защиты не произойдет. Для расчёта каждой ситуации следует использовать уравнения из раздела «Методы расчёта». Тем не менее, поток воды от спринклеров должен быть одним из средств активации системы противодымной защиты, даже если он и применяется в качестве резервного способа. Активация с помощью спринклеров может служить эффективным основным средством активации в тех случаях, когда спринклеры расположены на более низких потолках.

Ручное управление

Средство ручного включения и отключения системы противодымной защиты должно быть установлено в месте, доступном для сотрудников пожарного подразделения.

Надёжность систем противодымной защиты

Анализ неисправностей

Каждая система противодымной защиты должна подвергаться анализу неисправностей с целью определения влияния неисправности, неправильной работы или частичной работы каждого из основных компонентов системы в процессе её запланированной работы. Особое внимание следует обратить на те системы, которые предназначены поддерживать давление или баланс потоков между прилегающими помещениями с целью контроля над перемещением дыма. Если обнаружено, что неисправная работа компонента приводит к обратному движению дымового потока или опусканию границы дымового слоя на уровень опасный для жизни людей, необходимо определить вероятность возникновения этого события и степень, до которой работа этого компонента может быть сокращена.

Надёжность

Надёжность системы противодымной защиты зависит от надежности отдельных компонентов, функциональной зависимости компонентов друг от друга и степени избыточности. Надежность отдельных компонентов (например, аппаратное обеспечение, программное обеспечение и интерфейсы других систем) включает в себя их функционирование при нормальных условиях эксплуатации под влиянием факторов окружающей среды на протяжении срока службы системы и их способность противостоять нагрузкам при пожаре. Как правило, такая проверка компонентов проводится в форме оценки этих компонентов независимой исследовательской лабораторией. Однако, списка или классификации компонентов недостаточно для обеспечения их надёжности. Кроме того, влияние функциональной зависимости компонентов друг от друга невозможно легко установить посредством оценивания отдельных компонентов. Для этого необходим анализ надежности систем целиком. Также необходимы частое техобслуживание и проверки для оценки надёжности системы на протяжении её срока службы. Контроль над компонентами системы увеличивает надёжность системы посредством своевременного визуального или слухового указания на неисправность компонента и облегчает незамедлительный ремонт.

Периодические испытания

Периодические испытания необходимы для того, чтобы удостовериться, что система функционирует и будет надёжно работать в случае необходимости. Необходимо обеспечить средства для проведения периодических испытаний системы противодымной защиты с целью проверки её функционирования. Системы должны быть спроектированы таким образом, чтобы была возможность проводить испытания без использования специального оборудования, за исключением того, что входит в комплект системы. Поскольку проводить измерения при проверке рабочих характеристик системы зачастую сложно из-за трудности доступа, желательно, чтобы по возможности контрольно-измерительные приборы были полностью или частично встроены в систему, либо часть их была снабжена портативными мониторами.

МЕТОДЫ РАСЧЁТА

Основные принципы

Подходы к проектированию (методология)

Три разных подхода к проектированию систем противодымной защиты описывают следующим образом:

(1) Масштабное моделирование с использованием физической модели меньшего масштаба с соблюдением установленных законов масштабирования, в соответствии с чем проводятся мелкомасштабные испытания с целью определения требований и возможностей моделируемой системы противодымной защиты.

(2) Алгебраические уравнения для анализа ряда решений, полученные преимущественно на основе корреляции результатов крупно- и мелкомасштабных испытаний.

(3) Модели пожаров в помещении, в которых используются как теоретические значения, так и значения, полученные эмпирическим путем, для оценки условий в помещении.

Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и ограничения. Ни один из них не является исчерпывающим. Несмотря на то, что результаты, полученные с использованием разных подходов, обычно должны быть схожими, они не всегда идентичны. Современный уровень разработок при всей своей прогрессивности имеет под собой эмпирическую основу, а итоговая теория, доказуемая средствами фундаментальной физики ещё не разработана. По своей сути каждый метод вычислений основан на вовлечении воздуха (или других окружающих газов) в восходящую струю от огня. Разница приблизительно в 20% в вовлечении наблюдается между широко применяемыми эмпирическими уравнениями вовлечения, такими, какие представлены в данной главе, или в зонных моделях пожара. У пользователей может возникнуть желание добавить соответствующий коэффициент безопасности к вытяжной мощности для учета этой неопределённости. Далее приведено краткое описание преимуществ выше перечисленных подходов.

Масштабное моделирование

Масштабное моделирование предпочтительно в случаях, когда оцениваемое помещение имеет выступающие части или другое необычное устройство, мешающие формированию свободно восходящей струи. При масштабном моделировании модель обычно пропорциональна в размерах реальному зданию. Мощность пожара и интерпретация результатов подвержены законам масштабирования, как описано в разделе «Законы масштабирования». Несмотря на его разумность, данный подход является дорогостоящим и трудоёмким, и результаты его действительны только для проведённых испытаний. Поскольку данный подход обычно применяется для сложных конструкций, важно, чтобы серия испытаний охватывала все потенциальные изменения факторов, таких как положение и мощность пожара, размещение и мощность вытяжных и приточных потоков, изменения температуры внутри помещения (стратификация или температурные градиенты от пола до потолка) и другие переменные. Есть вероятность того, что с помощью масштабных моделей не удастся оценить обнаружение пожара.

Алгебраические уравнения

Алгебраические уравнения, содержащиеся в данном руководстве, представляют собой средство расчёта отдельных факторов на настольном компьютере, которые в совокупности могут использоваться с целью установки требований к проектированию системы противодымной защиты. Представленные уравнения считаются наиболее точными, простыми алгебраическими выражениями доступными для предложенных целей. В целом, они ограничены случаями, включающими в себя пожары с постоянной скоростью выделения тепла ("стационарные пожары", как описано в подразделе с одноимённым названием) или пожары, при которых скорость выделения тепла возрастает как функция квадрата времени ("нестационарные пожары", как описано в подразделе с одноимённым названием). Уравнения не подходят для других условий пожара или для условия, когда огонь изначально разрастается как функция времени, а затем, достигнув максимума, горит в стационарном режиме. В большинстве случаев это ограничение можно устранить разумным использованием уравнений. Каждое из уравнений получено на основе экспериментальных данных. В некоторых случаях данные испытаний ограничены либо собраны в пределах ограниченного числа мощностей пожаров, размеров помещения или точек измерения. В руководство, где это возможно, включены комментарии по диапазону данных, использованных при выведении представленных уравнений. Важно учитывать эти ограничения.

Следует соблюдать осторожность при применении уравнений для решения переменных, помимо тех, что представлены слева от знака равенства, за исключением случаев, когда очевидно, насколько результат чувствителен к незначительным изменениям в любой из участвующих переменных. Если данные ограничения представляют собой предел, препятствующий потребностям пользователя, следует рассмотреть возможность совместить использование уравнений в совокупности с масштабной моделью или моделями пожаров в помещении. При использовании уравнений необходимо принимать во внимание чувствительность изменений в решаемых переменных.

Модели пожаров в помещении

Возможности современных компьютеров позволяют выполнять некоторые модели из серии моделей пожаров в помещении. Все модели пожаров в помещении решают уравнения сохранения для отдельных областей (контрольных объемов). К моделям пожаров в помещении, как правило, относятся зонные модели или модели вычислительной гидродинамики.

Зонные модели. Зонные модели представляют собой более простые модели, и с ними можно работать на персональных компьютерах. Зонные модели делят помещение на две зоны: верхнюю зону, содержащую дым и горячие газы, выделяющиеся от огня, и нижнюю зону, являющуюся источником вовлекаемого воздуха. Размеры этих двух зон меняются в течение пожара в зависимости от скорости потока из нижней в верхнюю зону, скорости дымоудаления в верхней зоне и температуры дыма и газов в ней. Из-за малого количества зон в зонных моделях используются проектные формулы по переносу тепла и массы для оценки переноса массы и энергии из нижней зоны в верхнюю, потери тепла и массы из верхней зоны и других свойств. Как правило, уравнения допускают, что условия однородны в каждой соответствующей зоне.

В зонных моделях источником потока, направленного в верхнюю зону, является струя от огня. Все зонные модели имеют уравнение струи. Некоторые модели позволяют пользователю выбирать одно из нескольких уравнений струи. В основе самых современных моделей лежит понятие осесимметричной струи.

Поскольку разработанные в настоящее время зонные модели допускают, что в помещении нет уже существующих изменений в температуре, они не могут напрямую учитывать стратификацию. Кроме того, зонные модели допускают, что припотолочный дымовой слой формируется мгновенно и равномерно от стены до стены. Это не позволяет учесть начальное поперечное распространение дыма под потолком. Итоговая погрешность может оказаться существенной в помещениях с большой площадью потолков.

Тем не менее, зонные модели, могут рассчитывать многие важные факторы в процессе событий (например, уровень, температуру, состав и скорость опускания дыма) при любом пожаре, заданном пользователем. Большинство зонных моделей рассчитывают степень потери тепла на границах помещения. Одни модели рассчитывают воздействие механического дымоудаления, а другие прогнозируют отклик систем обнаружения пожара, реагирующих на дым или повышение температуры.

Модели вычислительной гидродинамики. Модели вычислительной гидродинамики, также называемые полевыми моделями, обычно требуют наличия компьютеризованных рабочих мест большой мощности или универсальных ЭВМ и отличных навыков работы с ними и интерпретации данных. Тем не менее, модели вычислительной гидродинамики могут по своему потенциалу преодолеть ограничения зонных моделей и дополнить или заменить масштабные модели.

Как и зонные модели, модели вычислительной гидродинамики решают основные уравнения сохранения. В моделях вычислительной гидродинамики помещение поделено на множество ячеек (или зон), и для расчета перемещения тепла и массы между зонами используются уравнения сохранения. Из-за большого количества зон в моделях вычислительной гидродинамики стараются не использовать более общие инженерные уравнения, применяемые в зонных моделях. Благодаря использованию маленьких ячеек модели вычислительной гидродинамики могут исследовать ситуацию более подробно и учитывать влияние неправильных форм и необычного перемещения воздуха, которые не могут быть учтены ни зонными моделями, ни алгебраическими уравнениями. Уровень детализации превышает уровень, который обычно наблюдается при использовании масштабных моделей или может быть выведен из них.

Примечание.

Широко распространённые упрощения зонных моделей приведены в таблице A3.1.1.3(a).

Верификация результатов пожарных моделей важна, поскольку иногда проще получить результаты, чем определить их точность. Результаты компьютерных пожарных моделей прошли проверку на достоверность в сравнении с ограниченным диапазоном экспериментальных условий; ознакомление с этими результатами должно повысить уровень доверия пользователя. Тем не менее, поскольку сама природа применения пожарных моделей состоит в том, чтобы быть инструментом для исследования неизвестных условий, будут возникать условия, для которых необходимо проводить верификацию любой из моделей. Именно в таких случаях пользователю потребуется помощь в определении точности модели.

Чтобы достичь точного пожарного моделирования условий, проверка которых не была проведена, существуют три сферы, требующие понимания. Первая сфера подразумевает понимание того, какие объекты моделируются. Вторая сфера подразумевает соответствующий перевод объектов реального мира во входные параметры пожарной модели. Третья сфера включает в себя понимание процесса преобразования моделью входных данных в выходные.

Специалист по моделированию должен безошибочно охарактеризовать следующие объекты: топливо, помещение и условия окружающей среды, как указано в таблице A3.1.1.3(b). Скорость выделения тепла от топлива является важной характеристикой, которую необходимо описать. Существует много других характеристик топлива, которые также влияют на рост пожара, такие как образование продуктов горения, доля лучистой теплопотери, соотношение массы топлива к массе воздуха при горении и теплота сгорания. Тем не менее, желаемая точность ответа определяет, какие из этих характеристик следует включить, а какие можно не учитывать. Описания вентиляционных отверстий в помещении также должны быть надлежащим образом оценены. Часто зоны утечки могут являться причиной значительных непредвиденных потоков газа, особенно в условиях предельных погодных условий с учётом температуры или ветра.

Перевод фактических характеристик в формат входных данных модели является второй основной сферой моделирования. Некоторые объекты не учитываются, поскольку их влияние незначительно. Другие объекты должны быть представлены в несколько изменённой форме. Примером первого случая может быть исключение воздуховода механической вентиляции, когда большая дверь в помещение остаётся открытой. Примером второго случая является огонь, горящий на поверхности стены на расстоянии 1,5 м по вертикали. Принимается, что огонь расположен на уровне пола – самом нижнем уровне, где может происходить вовлечение воздуха в струю.

Последняя сфера является, пожалуй, наиболее сложной для начинающего специалиста; она касается понимания того, как в модели происходит преобразование входных данных в выходные. Для начинающего специалиста нецелесообразно пытаться постичь все подробности процесса преобразования, однако, он может предугадать многие результаты, имея базовое представление о динамике пожара и практические знания трёх законов сохранения. Законы сохранения могут быть выражены с помощью дифференциальных уравнений для воспроизведения плавных непрерывных изменений свойств, происходящих при реальных пожарах. Чем больше отклонение от дифференциального представления законов сохранения, тем больше неопределённость в точности модели за пределами диапазона верификации. Потенциальная неточность модели связана с относительным влиянием конкретного члена уравнения. Члены уравнения, оказывающие наибольшее влияние, содержат переменные, которые возрастают с показателем экспоненты >1.

Для верификации точности модели могут использоваться алгебраические соотношения, другие пожарные модели, масштабные модели и здравый смысл. Верификация с помощью алгебраических уравнений применяется только при наличии экспериментальных условий, на основе которых они были выведены. Выход за пределы этих экспериментальных условий может быть основан на тенденциях в экспериментальных граничных точках. Использование одной модели для верификации другой модели обеспечивает её воспроизводимость, но не обязательно точность, за исключением случаев, когда верификация второй модели проведена отдельно.

Экспериментальные масштабные модели всегда могут использоваться для верификации результатов компьютерных моделей. Уменьшенные модели наиболее экономичны; на основе подобных измерений легко определить тенденции, но более точные данные получить сложно.

Таблица А 3.1.1.3(a) Упрощения в зонных моделях

Топливо
• Скорость выделения тепла не увеличивается при обратном потоке тепла из дымового слоя. • Нет чёткого представления о скорости выделения тепла на стадии пожара после вспышки, и лишь в нескольких моделях реализуется попытка её моделирования. • Моделируется образование CO, но его механизм не до конца понятен на стадии вспышки. • Некоторые модели не учитывают горение избыточного пиролизата на выходе из вентиляционного отверстия.
Струи
• Вовлечение массы в струю составляет ±20%, и в помещениях с высокими потолками его достоверность не достаточно подтверждена. • Нет временно́го отставания при перемещении дыма от огня до конкретного уровня в основной струе или припотолочной струе. • Модели растекающихся струй недоработаны. • Не все модели струй учитывают геометрию зоны топлива. • Вовлечение воздуха в лестничных шахтах не моделируется. • Вовлечение воздуха из горизонтальных вентиляционных отверстий моделируется не во всех моделях.
Слои
• Слои застойного горячего дыма под потолком не моделируются. • Температура однородна.
Теплопередача
• Некоторые модели не делают различия между термически тонкими и термически толстыми стенами. • Нет теплопередачи через преграды из помещения в помещение. • Влияние моментов сил не учитывается.
Вентиляция
• Смешивание воздуха у вентиляционных отверстий определяется на основе корреляций.

Таблица А 3.1.1.3(b) Упрощения в полевых моделях

Описание горящего топлива
• Изменение скорости выделения тепла в зависимости от времени • Высота огня • Лучистая доля • Скорость образования продуктов горения • Площадь пожара (твёрдая поверхность, пролив, горелка)
Описание помещения
• Высота потолка; • Размер, расположение и динамическое состояние (открыто или закрыто) вентиляционного отверстия (включая зону утечки) • Теплофизические свойства материалов стен, потолка и пола • Расположение, мощность и состояние механической вентиляции • Наличие балок или ферм • Временно́е отставание при перемещении дыма в основной струе или припотолочной струе • Разрушение конструкции • Начальная температура
Описание условий окружающей среды
• Высота • Давление окружающей среды • Температура окружающей среды • Скорость и направление ветра

- Относительная влажность
- Температура снаружи помещения

Законы масштабирования

Важность процессов масштабирования в данном руководстве приписывается моделированию перемещения горячих газов сквозь конфигурации здания при пожаре. Горение и излучение от пламени не учитываются. Рост пожара не моделируется. Необходимо, чтобы пожар был задан на основе постоянной или меняющейся со временем скоростью выделения тепла.

Моделирование дымового потока для зданий основано на поддержании равновесия между плавучестью дыма и конвективными «силами» без учета влияния вязкости и теплопроводности. Однако, игнорирование этих членов вблизи границ твёрдых тел не даст достоверных результатов. Определённой компенсации можно достичь в масштабной модели при выборе других материалов конструкции.

Масштабная модель может быть разработана, основываясь на соотношениях в таблице 3.1.2.2. Модель должна быть достаточно большой, чтобы можно было добиться турбулентного потока полномасштабной системы. Уравнения масштабирования, соотносящие полномасштабные условия *(F)* с условиями в масштабной модели *(m)* представлены в таблице 3.1.2.2, при допущении, что существуют одинаковые условия окружающей среды.

Таблица 3.1.2.2 Уравнения масштабирования

Геометрическое положение	$x_m = x_F\,(l_m/l_F)$
Температура	$T_m = T_F$
Перепад давлений	$\Delta p_m = \Delta p_F\,(l_m/l_F)$
Скорость	$v_m = v_F\,(l_m/l_F)^{1/2}$
Суммарная скорость выделения тепла	$Q_m = Q_F\,(l_m/l_F)^{5/2}$
Конвективная теплоотдача	$Q_{c,\,m} = Q_{c,\,F}\,(l_m/l_F)^{5/2}$
Объёмный расход воздуха при дымоудалении	$V_{fan,\,m} = V_{fan,\,F}\,(l_m/l_F)^{5/2}$
Тепловые свойства помещения	$(kpc)_{w,\,m} = (kpc)_{w,F}\,(l_m/l_F)^{0.9}$

где
c – удельная теплоёмкость материалов помещения (стена, потолок);
k – удельная теплопроводность материалов помещения (стена, потолок);
l – длина;
Δp – перепад давлений;
Q – скорость выделения тепла;
t – время;
T– температура (окружающей среды и дыма);
v – скорость;
V – объёмная скорость дымоудаления;
x – положение;
ρ – плотность;
c – конвективный;
F – полномасштабная модель;
m– мелкомасштабная модель (макет);
w – стена.

Дополнительную информацию смотрите в подразделе «Соотношения масштабирования» раздела «Справочная информация».

В остальной части раздела «Методы расчёта» описаны методы вычисления разных расчётных параметров, основанные на алгебраических уравнениях.

Образование двухслойной среды

Задержка в активации вытяжных вентиляторов может привести к опусканию дыма ниже расчётной высоты границы дымового слоя. Кроме того, начинающееся накопление дыма на нижних уровнях может быть усугублено начинающейся температурной стратификацией по вертикали, приводящей к задержке перемещения дыма в верхние уровни большого помещения. Однако, при активированных системах дымоудаления и кондиционирования воздуха можно ожидать образование чистого нижнего слоя в соответствии с проектными допущениями.

Расчётный пожар

Все проектные вычисления, представленные в данном руководстве, зависят от скорости выделения тепла при пожаре. Таким образом, в качестве первого шага необходимо определить мощность расчётного пожара. Мощность расчётного пожара определяется на основе технического анализа характеристик топлива либо на основе эффектов, вызванных пожаром, либо и того, и другого. Кроме того, пожары могут рассматриваться как стационарные либо нестационарные.

Для торговых помещений часто приводится значение мощности расчётного пожара равное 5275 кВт. Оно преимущественно основано на статистическом распределении мощностей пожара в магазинах Великобритании со спринклерными системами. Менее 5% пожаров в этой категории имели мощность 5275 кВт. Геометрически пожар мощностью 5275 кВт в магазине описан как квадрат со стороной 3 м при приблизительном значении скорости выделения тепла на единицу площади равном 568 кВт/м^2.

Стационарные пожары

Стационарный пожар – это пожар с постоянной скоростью выделения тепла. Являясь стационарным, пожар будет быстро разрастаться, пока не достигнет некоторого предела. Дальнейшее его распространение ограничено либо противопожарными действиями (в ручном или автоматическом режиме), либо наличием достаточно большого расстояния до ближайших горючих материалов.

Влияние спринклеров на мощность пожара

Если нет причины ожидать, что пожар будет распространяться после активации спринклеров, влияние спринклеров на мощность расчётного пожара можно учесть, допуская, что рост пожара прекратится с их активацией. Иными словами, расчётный пожар – это расчётная мощность пожара в момент активации спринклеров. Предполагается, что огонь продолжает гореть с этой мощностью вплоть до того, как сгорит всё имеющееся топливо, и при этом распыляемая спринклерами вода не оказывает дальнейшего воздействия на процесс горения. Как вариант, если пожарные испытания будут регулироваться работой спринклеров, но не будут незамедлительно потушены под их воздействием, можно допустить экспоненциальное уменьшение скорости выделения тепла. Однако, если испытания для преобладающей высоты потолка покажут, что пожар горючего материала будет быстро потушен с помощью встроенной спринклерной системы, можно допустить, что горение в основном прекратится во время работы спринклеров.

Примечание.

Полномасштабные пожарные испытания для офисов открытой планировки показали, что когда спринклеры установили контроль над огнём, но не способны потушить его немедленно из-за конфигурации топлива, скорость выделения тепла уменьшается экспоненциально следующим образом:

$$Q(t) = Q_{act^e}{}^{-kt}$$

где

$Q(t)$ – скорость выделения тепла в момент времени, t, после активации спринклеров, кВт;

Q_{act} – скорость выделения тепла при активации спринклеров, кВт;

t – время с момента активации спринклеров, с;

k – постоянная затухания, с$^{-1}$.

Значение постоянной затухания для офисных помещений при плотности распределения спринклеров 0,07 мм/с составляет 0,0023 для ситуаций с небольшими пожарными нагрузками на ограниченных площадях и 0,00155 с$^{-1}$ для ситуаций с большими пожарными нагрузками.

Разделительное расстояние между участками с пожарной нагрузкой

Расчётный пожар следует определять с учётом типа топлива, его расположения и конфигурации помещения. Выбор расчётного пожара следует начинать с определения основного набора горючих материалов и его максимально возможного размера. Расчётный пожар следует увеличить, если в пределах расстояния, R, указанного на рис.3.2.2.2(a) и определяемого с помощью уравнения (1), имеются иные горючие вещества. Обратите внимание, что если основной набор горючих материалов не круглой формы, необходимо рассчитать соответствующий радиус путём приравнивания площади пола, занимаемой набором горючих материалов, к площади круга равноценного радиуса. В расчётах необходимо учитывать всю площадь пола, заставленную предметами или находящуюся между ними. Например, если набор горючих материалов состоит из предметов мебели, изображённых на рис.3.2.2.2(b), площадь набора горючих материалов включает в себя площадь, покрытую мебелью, а также площадь между предметами мебели.

$$R = \left(\frac{Q}{12\pi q''} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где

R – разделительное расстояние от горящего объекта до центра набора горючих материалов, м;

Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт;

q'' – падающий тепловой поток, необходимый для самопроизвольного возгорания, кВт/м^2.

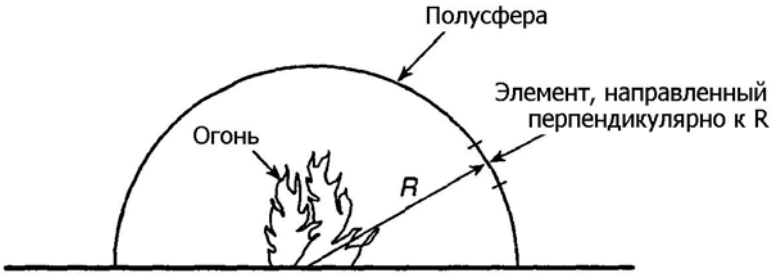


Рис. 3.2.2.2(a) Разделительное расстояние, *R*

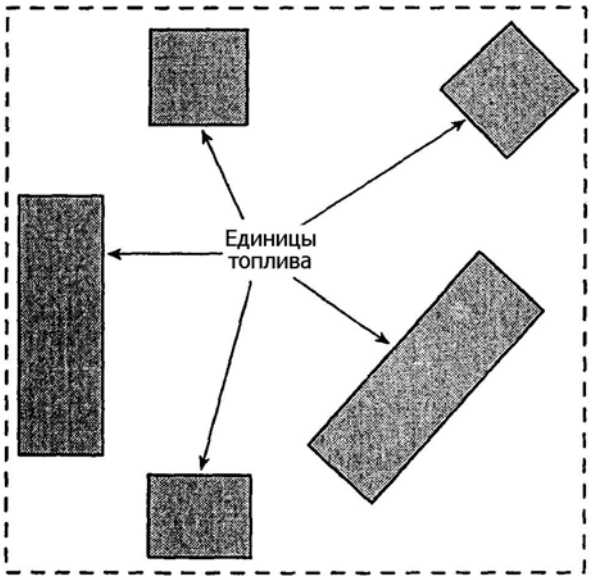


Рис. 3.2.2.2(b) Единицы топлива

Мощность расчётного пожара

Описать фиксированную мощность расчетного пожара, применимую ко всем ситуациям, не представляется реалистичным. При определении мощности расчётного пожара необходимо учитывать тип и количество топлива.

Нестационарные пожары

Нестационарный пожар – пожар, изменяющийся относительно времени. Для нестационарных пожаров обычно используется зависимость от квадрата времени. В таком случае скорость выделения тепла в любой момент времени может быть вычислена с помощью уравнения (2):

$$Q = 1000\left(\frac{t}{t_g}\right)^2 \qquad (2)$$

где

Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт;

t – время от момента расчётного возгорания, с;

t_n – время роста, с.

Время роста пожара – это временной интервал от момента расчётного возгорания до момента, когда мощность пожара превысит 1000 кВт. Более подробную информацию по квадратичным пожарам смотрите в подразделе «Квадратичные пожары» раздела «Справочная информация».

Благодаря динамике вторичных возгораний, профиль квадрата времени может использоваться в инженерных целях до момента, когда пожар распространится на большую территорию. Таким образом, профиль квадрата времени разумно использовать до того момента, когда рост пожара ограничивается либо противопожарными мероприятиями, либо наличием достаточного расстояния до соседних участков с горючей нагрузкой, что позволяет предотвратить дальнейшее возгорание. После этого момента предполагается, что мощность пожара больше не увеличивается.

Предупреждение о минимальной мощности расчётного пожара

За мощность расчётного пожара выбирается самый неблагоприятный сценарий из возможных. Предостерегаем проектировщиков и инженеров-исследователей от выбора средних мощностей пожара, основанного ис-

ключительно на типе или ограниченном количестве горючих материалов, имеющихся в наличии или предполагаемых.

В помещениях с низкими потолками [высота потолка ниже 7,6 м] при наличии спринклерных систем расчётный пожар состоит либо из стационарного расчётного пожара, либо из пожара, растущего до некоторого устойчивого порога мощности, например, благодаря работе автоматической системы пожаротушения.

В помещениях с высокими потолками [высота потолка больше либо равна 7,6 м], где спринклерные системы либо отсутствуют, либо ожидается, что их работа начнётся с существенной задержкой, расчётный пожар может состоять либо из стационарного расчётного пожара, либо из пожара, который растёт до некоторого устойчивого порога мощности. Скорость выделения тепла для стационарной стадии расчётного пожара должна быть, по меньшей мере, 2110 кВт. Расчётные пожары с меньшей скоростью выделения тепла основываются на строгом контроле топлива и поддержании минимальных расстояний между участками и не учитывают текущие либо сезонные «временные» варианты применения помещения или его видоизменения.

Обнаружение пожара и активация спринклеров

Реакция пожарных детекторов и спринклеров, закреплённых под потолком, может быть оценена на основе повышения температуры, вызванного огнём в этих местах. Повышение температуры зависит от расстояния по вертикали от основания огня и радиуса от центральной оси огня. В стандарте NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации» [3] содержится методика определения расстояния между детекторами повышения температуры [для высоты менее 9 м], основанная на мощности и скорости роста пожара, который необходимо обнаружить, разных высотах потолка и температуре окружающей среды. Для потолков высотой более 9 м необходимо провести технический анализ.

Стратификация дыма

Потенциальная возможность стратификации связана с разницей между температурой дыма и температурой окружающего воздуха на любом из уровней. Максимальная высота, на которую поднимается дымовая струя, особенно сразу после возгорания, зависит от конвективной скорости выделения тепла и колебания температуры окружающей среды в свободном пространстве.

Особый интерес представляют ситуации, в которых температура воздуха в верхней части большого свободного пространства выше температуры на нижних уровнях до пожара. Это может происходить в результате солнечной нагрузки, если потолок содержит остекление. Для оценки промежуточной стратификации существуют вычислительные методы.

Один из примеров представлен на рис.3.4.1. В данном случае температура окружающего воздуха относительно постоянная вплоть до уровня, над которым есть слой тёплого воздуха однородной температуры. Такая ситуация может происходить, если верхняя часть молла, атриума или другого большого пространства не занята, т.е. воздух в этой части остаётся некондиционированным.

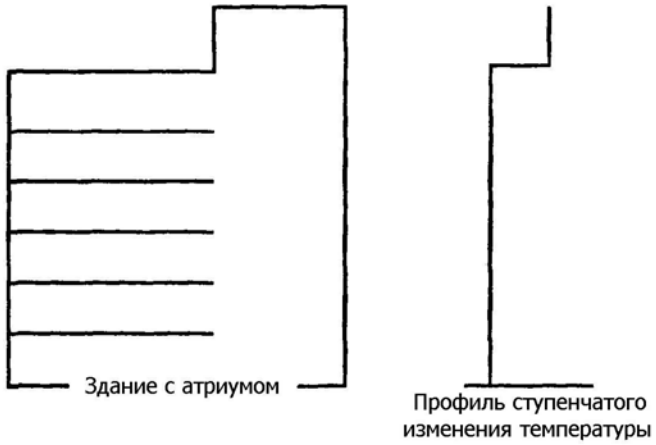


Рис. 3.4.1 Профиль температуры до пожара.

Ступенчатое изменение температуры

Если воздух внутри помещения имеет прерывистое изменение температуры на некоторой высоте над уровнем пола, потенциальную возможность стратификации можно оценить, используя соотношение температуры струи по осевой линии. Если температура струи по осевой линии равна температуре окружающей среды, струя более не является плавучей, теряет способность подниматься кверху и расслаивается на этой высоте.

Учёт стратификации дыма при проектировании систем противодымной защиты

После того, как система дымоудаления заработала в атриуме или другом большом помещении, стратификация будет устранена посредством удаления горячего дымового слоя. Задача, стоящая перед проектировщиком, состоит в том, чтобы обеспечить быстрое обнаружение дыма, используя все возможные профили температуры до пожара. При некоторых условиях, например, в ночное время и в холодные дни, есть вероятность, что стратификации не произойдёт, и любая дымовая струя будет быстро подниматься к крыше или потолку

помещения, и в этом случае детекторы дыма в верхней части или на самом верху помещения сработают. В других случаях, например, в жаркие летние дни или в дни с высокой солнечной нагрузкой, струя может не достигать верха помещения, и дым может распространяться на более низком уровне, чем предполагалось. В таком случае детекторы наверху помещения не сработают, и система противодымной защиты не включится. Нельзя с уверенностью сказать, какие условия могут быть в помещении на начало пожара. Независимо от условий на момент начала пожара, любая из приведённых ниже схем может обеспечить быстрое обнаружение дыма:

(a) *Луч, направленный вверх, для обнаружения дымового слоя.* Цель данного подхода заключается в быстром обнаружении образования дымового слоя при любых температурных условиях. Один или более лучей направлены вверх под углом и пересекают дымовой слой, независимо от уровня стратификации дыма. При использовании данного подхода в целях дублирования рекомендуется использовать более одного лучевого детектора дыма.

(b) *Горизонтальные лучи для обнаружения дымового слоя на разных уровнях.* Цель данного подхода заключается в том, чтобы быстро обнаружить образование дымового слоя при любых температурных условиях. Один или более лучевых детекторов находятся на потолке. Дополнительные детекторы расположены на других уровнях помещения. В задачу каждого конкретного проекта входит точное расположение лучей, и оно должно учитывать, что лучи должны находиться в основании любых выявленных некондиционируемых пространств (зон застойного воздуха) и на уровне или вблизи от расчётного уровня дыма с несколькими промежуточными положениями лучей на других уровнях.

(c) *Горизонтальные лучи для обнаружения дымовой струи.* Целью данного подхода является обнаружение восходящей струи, а не дымового слоя. Для данного подхода на уровне под самым низким прогнозируемым уровнем стратификации устанавливается ряд лучей на достаточно близком расстоянии друг от друга, чтобы обеспечить их пересечение со струёй. Расстояние между лучами рассчитывается на основе самой узкой возможной ширины струи на уровне обнаружения.

Аналогичная информация приведена в главе «Принципы противодымной защиты атриумов» (см. рис.14.14).

Свойства дымового слоя

Уравнения для расчёта глубины дымового слоя, среднего повышения температуры, оптической плотности и концентрации газов на этапе заполнения дымом и этапе квазистационарного пожара, регулируемого вентиляцией, приведены в таблице 3.5. Эти уравнения применимы к пожарам с постоянной скоростью выделения тепла и к квадратичным пожарам. Эти уравнения могут также использоваться для вычисления условий внутри дымового слоя от начала работы вентиляции.

Высота уровня первых признаков дыма в любой момент времени

Положение уровня первых признаков дыма в любой момент времени определяется на основе соотношений в подразделе «Высота уровня первых признаков дыма при отсутствии дымоудаления» и подразделе «Положение границы дымового слоя при работе дымовытяжных систем». Соотношения касаются следующих трёх ситуаций:

(1) Дымоудаление не осуществляется (см. подраздел «Высота уровня первых признаков дыма при отсутствии дымоудаления»).

(2) Массовый расход дымоудаления равен массовому расходу дыма, поступающего из струи в дымовой слой (см. подраздел «Массовый расход удаляемого дыма равен массовому расходу поступающего дыма»).

(3) Массовый расход дымоудаления меньше, чем массовый расход дыма, поступающего из струи в дымовой слой (см. подраздел «Массовый расход удаляемого дыма не равен массовому расходу поступающего дыма»).

Примечание.

Ограничение размера воздухозаборников вытяжных вентиляторов и их рассредоточение предназначено для предотвращения остывания дыма до того, как его можно будет удалить, удерживая дымовой слой под потолком. Это особенно важно для помещений, длина которых больше высоты, таких как моллы.

Воздухозаборники вентиляторов должны быть рассредоточены, потому что высокая скорость дымоудаления в любой из точек в дымовых слоях малой толщины может вызвать подсасывание незадымлённого воздуха из-под дымового слоя, создавая ситуацию, напоминающую закупорку стока воды в ванной. Соответственно, задачей рассредоточения воздухозаборников вентиляторов является установление умеренной и однородной скорости дымоудаления по всему дымовому слою.

Таблица 3.5 Уравнения для расчета свойств дымового слоя

Параметры	Нерегулируемые вентиляцией пожары		Регулируемые вентиляцией пожары
	Стационарные пожары	Квадратичные пожары	
ΔT	$T_0\{[\exp(Q_n/Q_0)] -1\}$	$T_0\{[\exp(Q_n/Q_0)] -1\}$	$[60(1 - \chi_1)Q_c]/(\rho_0 c_p V)$
D	$(D_m Qt)/[\chi_\alpha \Delta H_c A(H - z)]$	$(D_m \alpha t^3)/[3\chi_\alpha \Delta H_c A(H - z)]$	$(60 D_m Q)/(\chi_\alpha \Delta H_c V)$
Y_i	$(f_i Qt)/[\rho_0 \chi_\alpha \Delta H_c A(H - z)]$	$(f_i \alpha\ t^3)/[3\rho_0 \chi_\alpha \Delta H_c A(H - z)]$	$(60 f_i Q)/(\rho_0 \chi_\alpha \Delta H_c V)$

где

A – площадь горизонтального поперечного сечения помещения, м^2;

C_p – удельная теплоёмкость, кДж/кг°С;

$D = L^{-1} \log(I_0/I)$, оптическая плотность;

D_m DV/m_f – массовая оптическая плотность (м^2/кг), измеряемая в потоке, содержащем весь дым из испытываемого образца материала;

f_i – коэффициент выделения продуктов горения i (кг продуктов горения i/кг топлива);

H – высота потолка, м;

ΔH_C – теплота полного сгорания, кДж/кг;

Q– скорость выделения тепла при пожаре, кВт;

Q_c – конвективная доля скорости выделения тепла, кВт;

$Q_n = \int(1 - \chi_1)Q\,dt$;

для стационарных пожаров: $Q_n = (1 - \chi_1)\,Qt$, Дж;

для квадратичных пожаров: $Q_n = (1 - \chi_1)\alpha t^3/3$, Дж;

$Q_0 = \rho_0 c_p T_0 A(H - z)$, Дж;

t – время с момента возгорания, с;

T_0 – абсолютная температура окружающей среды, К;

ΔT– повышение температуры дымового слоя, °С;

V – объёмный расход воздуха при вентиляции, м^3/мин;

Y_i – массовая доля продуктов горения i (кг продуктов горения i/кг дыма);

z – расстояние от верха топлива до границы дымового слоя, м;

α – коэффициент роста квадратичного пожара, Дж/с^3;

ρ_0 – плотность окружающего воздуха, кг/м^3;

χ_a – коэффициент полноты сгорания с максимальным значением равным 1;

χ_1 – коэффициент суммарной теплопотери из дымового слоя на границах атриума, максимальное значение - 1, максимальное повышение температуры произойдёт, если $\chi_1 = 0$.

Высота уровня первых признаков дыма при отсутствии дымоудаления

Стационарные пожары

Для стационарных пожаров высота уровня первых признаков дыма над поверхностью огня, z, может быть определена для любого значения времени, t, с использованием уравнения (3); при этом, если в результате расчётов получилось значение $z/H > 1{,}0$, это означает, что дымовой слой ещё не начал опускаться.

$$\frac{z}{H} = 1{,}11 - 0{,}28\ln\left(\frac{tQ^{1/3}/H^{4/3}}{A/H^2}\right) \qquad (3)$$

где

z – высота уровня первых признаков дыма над поверхностью огня, м;

H – высота потолка над поверхностью огня, м;

t – время, с;

Q – скорость выделения тепла при стационарном пожаре, кВт;

A – площадь поперечного сечения помещения, заполняемого дымом, м^2.

Уравнение (3) основано на экспериментальных данных из исследований с использованием однородных площадей поперечного сечения относительно высоты со значениями A/H^2 в диапазоне от 0,9 до 14 и для значений $z/H^3 \geq 0{,}2$. Данное уравнение используется для применения в случае наиболее неблагоприятного сценария, огня вдали от всех стен. Уравнение даёт завышенную оценку опасности, поскольку z относится к высоте уровня первых признаков дыма, а не границы дымового слоя.

Нестационарные пожары

Опускание уровня первых признаков дыма также может быть оценено для некоторых типов нестационарных пожаров, например, квадратичных пожаров. На основе базовой теории и небольших экспериментальных данных высота уровня первых признаков дыма над поверхностью огня, z, может быть оценена на заданный момент времени в соответствии с указанным ниже соотношением; при этом, если в результате расчётов получилось значение $z/H > 1{,}0$, это означает, что дымовой слой ещё не начал опускаться.

$$\frac{z}{H} = 0{,}91\left(\frac{t}{t_g^{2/5}H^{4/5}(A/H^2)^{3/5}}\right)^{-1{,}45} \qquad (4)$$

где

z – высота уровня первых признаков дыма над поверхностью огня, м;

H – высота потолка над поверхностью огня, м;

t – время, с;

t_g – время роста, с.

Уравнение (4) основано на экспериментальных данных из исследований со значениями A/H^2 в диапазоне от 1,0 до 23 и для значений $z/H \geq 0{,}2$. Уравнение (4) также основано на однородных площадях поперечного сечения с учётом высоты. Данное уравнение используется для применения в случае наиболее неблагоприятного сценария, огня вдали от стен. Уравнение также даёт завышенную оценку опасности, поскольку z относится к высоте уровня первых признаков дыма, а не границы дымового слоя.

Расход массы

Уравнения, представленные в двух предыдущих подразделах, пригодны для оценки положения дымового слоя в любой момент времени после возгорания. Для стационарного пожара суммарный расход массы, необходимый для поддержания постоянной скорости выделения тепла за определённый период времени, может быть определён следующим образом:

$$m = \frac{Q\Delta t}{H_c} \tag{5}$$

где
m – суммарный расход массы топлива, кг;
Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт;
Δt – продолжительность пожара, с;
H_c – теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Для квадратичного пожара суммарный расход массы за конкретный период времени может быть определён на основе уравнения:

$$m = \frac{333\Delta t^3}{H_c t_g^2} \tag{6}$$

где
m – суммарный расход массы топлива, кг;
Δt – продолжительность пожара, с;
H_c – теплота сгорания топлива, кДж/кг;
T_a – время роста, с.

Различные геометрические характеристики поперечных сечений и сложные геометрические характеристики

Уравнения (3) и (4) основаны на экспериментах, проведенных в однородных площадях поперечного сечения. На практике признаётся, что оцениваемые пространства не всегда имеют простую однородную геометрию. На опускание уровня первых признаков дыма в разных поперечных сечениях или сложных геометрических пространствах могут оказать такие условия, как наклонные потолки, изменения в площадях поперечного сечения в помещении и выступающие части на пути восходящей струи. В таких нестандартных случаях следует рассмотреть применение иных методов расчёта, которые различаются по степени сложности, но могут быть полезны при работе со сложными и неоднородными геометрическими характеристиками помещений:

(1) Масштабные модели *(см. подразделы «Масштабное моделирование» и «Законы масштабирования»)*;
(2) Модели вычислительной гидродинамики *(см. одноимённый подраздел)*;
(3) Видоизменённые зонные модели:

Зонная модель, основанная на заполнении дымом помещения с однородными геометрическими характеристиками поперечного сечения, подвергается изменениям с учётом изменённых площадей поперечного сечения пространства. Источник вовлечения воздуха может быть изменён с учетом прогнозируемого увеличения или сокращения вовлечения воздуха вследствие геометрических характеристик помещения, таких, как выступающие элементы;

(4) Комплексный анализ:

Расчёт помещений неравномерной формы производится при помощи уравнений (3) и (4) с применением максимальных, минимальных и промежуточных значений высоты помещения, вычисляемых по геометрическим характеристикам помещения в соответствии с эквивалентными геометрическими характеристиками высоты или объёма.

Более подробную информацию смотрите в подразделе «Расчёт для помещений сложных геометрических форм» раздела «Справочная информация».

Положение границы дымового слоя при работе дымовытяжных систем

Массовый расход удаляемого дыма равен массовому расходу поступающего дыма

После того, как система дымоудаления проработала значительный период времени, граница дымового слоя достигает равновесного положения, массовый расход удаляемого дыма равен массовому расходу дыма, поступающего из струи в основание дымового слоя. После того, как это положение будет достигнуто, его следует поддерживать на протяжении того времени, пока массовые расходы остаются равными. Массовый расход дыма, поступающего в основание дымового слоя при разных конфигурациях струи, описан ниже в подразделе «Массовая скорость дымообразования».

Массовый расход удаляемого дыма не равен массовому расходу поступающего дыма

Если массовый расход поступающего дыма больше удаляемого дыма, равновесное положение границы дымового слоя достигнуто не будет. Можно ожидать, что граница дымового слоя будет опускаться, но с меньшей скоростью, чем при отсутствии дымоудаления (см. подраздел «Высота уровня первых признаков дыма при отсутствии дымоудаления»). В таблице 3.7.2 представлена информация о положении дымового слоя как функции времени для осесимметричных струй при стационарных пожарах с условием неравных значений массовых расходов. Для других конфигураций струи необходим компьютерный расчёт.

Таблица 3.7.2 Увеличение во времени, необходимом для достижения дымовым слоем выбранного положения

		t/t_0					
z/H	**m/m_e =**	**0,25**	**0,35**	**0,5**	**0,7**	**0,85**	**0,95**
0,2		1,12	1,19	1,3	1,55	1,89	2,49
0,3		1,14	1,21	1,35	1,63	2,05	2,78
0,4		1,16	1,24	1,4	1,72	2,24	3,15
0,5		1,17	1,28	1,45	1,84	2,48	3,57
0,6		1,20	1,32	1,52	2,00	2,78	4,11
0,7		1,23	1,36	1,61	2,20	3,17	4,98
0,8		1,26	1,41	1,71	2,46	3,71	6,25

где

z – расчётная высота границы дымового слоя над источником огня;

H – высота потолка над источником огня;

t – время опускания границы дымового слоя до уровня z;

t_0 – значение t при отсутствии дымоудаления [см. уравнение (3)];

m – массовый расход дымоудаления (минус массовый расход в дымовой слой из других источников, помимо струи)

m_e – значение m, необходимое для сохранения границы дымового слоя на уровне z неограниченное количество времени [см. уравнение (8)].

Массовая скорость дымообразования

Высота границы дымового слоя может поддерживаться на постоянном уровне посредством удаления такого же массового расхода из дымового слоя, какой поступает в него из струи. Массовый расход, поступающий со струёй, зависит от конфигурации дымовой струи. В данном руководстве рассматриваются три конфигурации струи. Воздухозаборники вытяжных вентиляторов должны быть подобраны по размеру и распределены по помещению таким образом, чтобы свести к минимуму вероятность того, что воздух из-под дымового слоя будет засасываться сквозь дымовой слой, образуя явление, называемое «эффектом прокалывания». Для этого скорость в вытяжном воздухозаборнике не должна превышать то значение, после которого начинается подсасывание незадымлённого воздуха в дымовой слой.

Осесимметричные струи

Предполагается, что осесимметричная струя (см. рис.3.8.1) происходит от огня, возникающего на полу атриума вдали от всех стен. В этом случае происходит вовлечение воздуха со всех сторон и по всей высоте струи до уровня, на котором струя растворяется в дымовом слое.

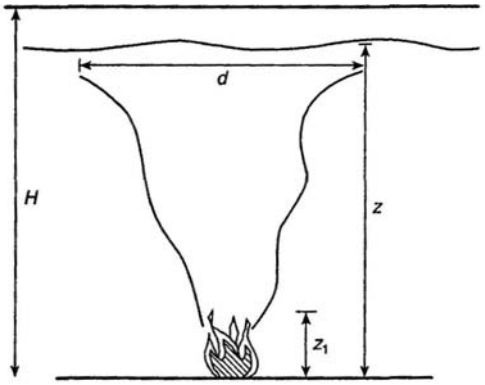


Рис. 3.8.1 Осесимметричная струя

Массовую скорость дымообразования можно определить, основываясь на скорости вовлечённого воздуха, поскольку количество продуктов горения, возникающих при пожаре, как правило, намного меньше скорости воздуха, вовлекаемого в струю.

Существует несколько уравнений для осесимметричных струй. Представленные далее уравнения приведены на основе стандарта NFPA 204 «Руководство по противодымной и тепловой вентиляции» [40]. Воздействия гипотетического источника не учитывается, поскольку они обычно малы при подобном применении, и до сих пор их можно было достаточно точно спрогнозировать только для пожаров пролива. Определить предельный уровень, соответствующий приблизительно высоте светового пламени, можно с помощью уравнения:

$$z_l = 0{,}166 Q_c^{2/5} \tag{7}$$

где

z_l – предельная высота пламени, м;

Q_c– конвективная теплоотдача при пожаре, кВт.

Массовый расход струи, *m,* над предельным уровнем рассчитывается на основе следующего уравнения:

$$m = 0{,}071 Q_c^{1/3} z^{5/3} + 0{,}0018 Q_c \qquad \left(z > z_l\right) \tag{8}$$

где

m – массовый расход в струе на высоте z, кг/с;

z – высота над топливом, м.

Массовый расход струи под языками пламени определяется на основе уравнения:

$$m = 0{,}032 Q_c^{3/5} z \qquad \left(z \le z_l\right) \tag{9}$$

Массовый расход, поступающий со струёй в дымовой слой, подсчитывается на основе уравнения (9), если чистая высота меньше высоты пламени [см. уравнение (7)], в остальных случаях - на основе уравнения (8). Чистая высота принимается за расчётную высоту границы дымового слоя над источником огня.

Следует отметить, что уравнения (8) и (9) напрямую не учитывают типы горящих материалов при пожаре, а лишь опосредованно – через скорость выделения тепла. Это связано с тем, что массовый расход вовлекаемого воздуха значительно больше массового расхода образуемых продуктов горения и с тем, что количество вовлекаемого воздуха является лишь функцией мощности, т.е. скорости выделения тепла при пожаре.

Огонь может находиться у края или в углу свободного пространства. В таком случае вовлечение воздуха в струю может происходить не со всех сторон струи, что приведёт к меньшему дымообразованию, чем в случае, когда вовлечение воздуха происходит со всех сторон. Таким образом, завышенные расчёты должны основываться на допущении, что вовлечение воздуха в струю происходит со всех сторон.

Примечание.

Испытания стационарных пожаров методом физического моделирования показали, что уравнение (8) даёт довольно точную оценку массового расхода дымовой струи для системы противодымной защиты атриумов, работающей при равновесных условиях. Результаты также показали, что дымовой слой был сильно смешанным. Средняя температура в дымовом слое может быть приблизительно выражена при помощи адиабатического расчёта температуры струи на высоте границы дымового слоя [см. уравнение (13.25) в главе «Принципы противодымной защиты атриумов»].

При равновесных условиях высота z в уравнении (8) обозначает положение границы дымового слоя над уровнем горения (рис. А.1.4.6). Ниже границы дымового слоя находится переходная зона. Для эффективной работы системы противодымной защиты глубина переходной зоны должна составлять приблизительно 10% от высоты атриума. Температура и другие параметры дыма в переходной зоне снижаются линейно по высоте между границей дымового слоя и нижней границей переходной зоны.

Струи, проникающие с балкона

Растекающаяся балконная струя – это струя, которая протекает под балконом, огибает его, что создаёт впечатление, будто она растекается с самого балкона, и поднимается кверху. Сценарии с растекающимися балконными струями включают в себя дым от огня, достигающий потолка, балкона или другого горизонтального выступа значительных размеров, а затем растекающегося горизонтально до края «балкона». Свойства образующейся в результате этого растекающейся балконной струи зависят от характеристик пожара, ширины растекающейся струи и высоты потолка над огнём. Кроме того, важен путь горизонтального перемещения дыма от осевой линии струи до края балкона.

Уравнения (13.17, 13.18) и рисунки (рис.13.8), касающиеся струй, проникающих с балкона, смотрите в одноимённом разделе главы «Принципы противодымной защиты атриумов».

Оконные струи

Струи, вытекающие из проёмов в стенах, дверных или оконных, в большое помещение, свободное пространство называют оконными струями (см. рис.3.8.3.1). Уравнения (13.19–13.23) и рисунки (рис.13.9), касающиеся оконных струй, смотрите в одноимённом разделе главы «Принципы противодымной защиты атриумов».

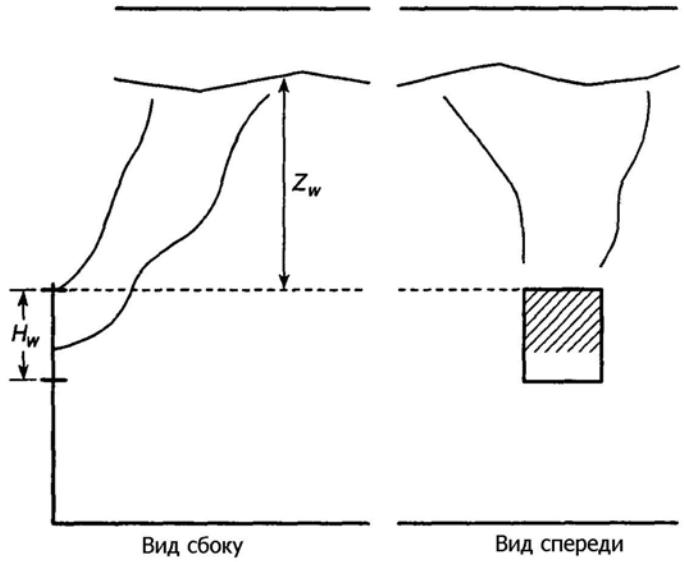


Рис. 3.8.3.1 Оконная струя

Ширина струи

По мере того, как струя поднимается вверх, происходит вовлечение воздуха в неё, и она расширяется. Как правило, общий диаметр струи может быть рассчитан по формуле:

$$d = K_d z \tag{10}$$

где
d – диаметр струи, м;
z – высота, м;
K_d – постоянная диаметра.

Постоянная диаметра может варьироваться от 0,25 до 0,5. Рекомендуется выбирать такое значение K_d, чтобы итоговые вычисления были завышенными:

(1) K_d = 0,5 приводит к завышенной оценке контакта струи со стенами;
(2) K_d = 0,25 приводит к завышенным оценкам при учёте обнаружения дымовой струи с помощью детекторов лучевого типа.

Температура струи

Информацию о средней температуре струи и температуре струи по осевой линии, а также соответствующие уравнения (13.25 и 13.7) смотрите в главе «Принципы противодымной защиты атриумов».

Количество вытяжных отверстий

Информацию о расчёте количества вытяжных отверстий и соответствующие уравнения (13.40–13.43) смотрите в одноимённом подразделе главы «Принципы противодымной защиты атриумов».

Уравнения для расчёта «эффекта прокалывания» первоначально разрабатывались для расчёта отверстий естественной вентиляции. Они также применяются для расчёта системы механического дымоудаления. Численные коэффициенты, включенные в уравнения (13.40) и (13.41), даны с расчётом, что вытяжные отверстия расположены близко к стене. При размещении вытяжных отверстий ближе к центру резервуара дыма, могут использоваться коэффициенты с бóльшими значениями.

Несмотря на то, что данные уравнения были разработаны для естественной вентиляции, исследования путём физического и численного моделирования показали, что они также пригодны для систем механического дымоудаления. В исследованиях использовались физические модели высотой 5,5 м и 12,2 м с объёмным расходом до 25 м^3/с на каждое вытяжное отверстие (при средней скорости дымоудаления через отверстие до 30 м/с). Результаты физического моделирования указывают на то, что глубина дымового слоя может быть снижена приблизительно до 10% от чистой высоты при использовании нескольких вытяжных отверстий с целью минимизировать массовый/объёмный расход на каждом отдельном вытяжном отверстии. Исследования методом численного моделирования показали, что результаты можно масштабировать и для более высоких атриумов.

Увеличив количество вытяжных отверстий, можно снизить скорость дымоудаления через каждое отверстие. Наибольшая эффективность физической модели вытяжной системы была получена при снижении скорости через отверстие до 10 м/с и более. Также рекомендуется, чтобы отношение глубины дымового слоя к диаметру вытяжного отверстия (d/D) превышало значение 2 (для прямоугольных вытяжных отверстий следует применять формулу $D = 2\,ab/(a + b)$, где a и b являются длиной и шириной вытяжного отверстия). В таком случае, скорость потока в нижнем слое переходной зоны, производимого вытяжной системой, будет существенно ниже скорости через вытяжное отверстие, и доминирующий поток будет направлен из дымового слоя к вытяжному отверстию.

Попытки сократить глубину дымового слоя до уровня меньше минимальной глубины при помощи высокой вытяжной скорости оказались безуспешными. В этом случае система дымоудаления вызывает смешивание холодного воздуха с дымовым слоем. Дымовой слой охлаждается и становится более разряженным, но его глубина увеличивается.

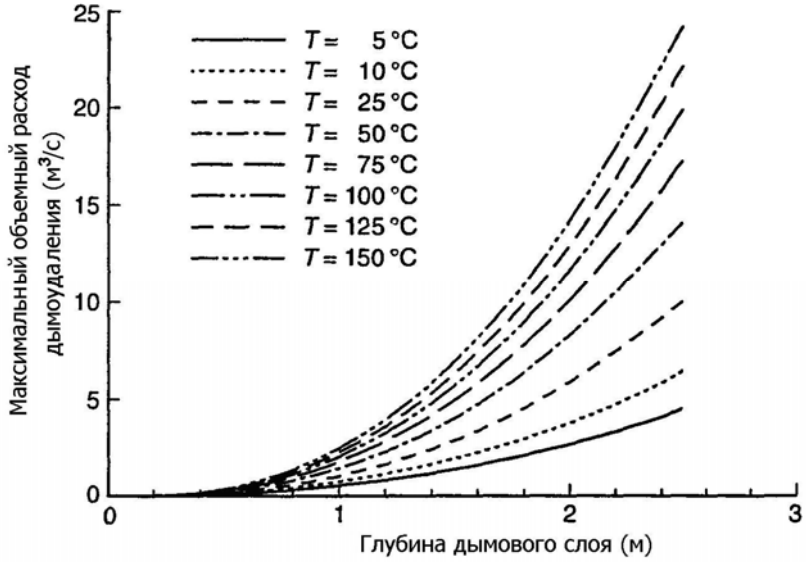


Рис. А.3.9 Влияние глубины и температуры дымового слоя на скорость дымоудаления.

Влияние глубины дымового слоя и температуры дыма на максимальную скорость дымоудаления представлено на рис.А.3.9. Эффективность системы дымоудаления стремительно растёт при увеличении глубины дымового слоя и в меньшей степени - при увеличении температуры в дымовом слое. Эти факторы в сочетании со снижением массового расхода дыма при снижении значения z обеспечивают механизм самокомпенсации системы дымоудаления в атриумах. Вопросы, рассмотренные в данном подразделе, имеют большое значение при работе с системами, в которых согласно проектным требованиям чистая высота должна быть прямо под вытяжным отверстием.

Объёмный расход

Информацию об объёмном расходе, а также соответствующее уравнение (13.27) смотрите в одноимённом подразделе главы «Принципы противодымной защиты атриумов».

Максимальная скорость подачи воздуха

Скорость подачи очищенного воздуха по периметру большого свободного пространства необходимо ограничить достаточно низкими значениями, чтобы не происходило значительного отклонения дымовой струи, которое будет вызывать увеличение скорости вовлечения воздуха в струю или приведёт к нарушению границы дымового слоя. Основываясь на данных об отклонении пламени, рекомендуется максимальная скорость подачи воздуха около 1 м/с. В случаях, когда поддержание уровня границы дымового слоя на одной высоте не является целью проектирования системы, нарушение дымовой струи из-за скорости подачи воздуха можно считать не наносящим ущерба.

Требования к встречному воздушному потоку

Для предотвращения проникновения в большое помещение дыма, возникающего в смежном помещении, дымоудаление в смежном помещении должно производиться с достаточной скоростью, чтобы средняя скорость воздуха в проёме из большого помещения была больше минимального предела. Предел средней скорости, *v,* может быть вычислен на основе уравнения, предложенного Хескестадом:

$$v = 0{,}64[gH(T_f - T_0)/T_f]^{1/2} \quad (11)$$

где

v – скорость воздуха, м/с;

g – ускорение свободного падения (9,8 м/с^2);

H – высота проёма, м;

T_f – температура нагретого дыма, K;

T_0 – температура окружающей среды, K.

Например, при H = 3,05 м, T_f = 347 K (значение, считающееся реалистичным для помещений со спринклерами) и T_0 = 294 K, предельная скорость равна 1,37 м/с. При тех же условиях, но с T_f = 1166°K (значение, считающееся реалистичным для помещений без спринклеров) предельная скорость равна 3 м/с.

Для предотвращения проникновения в смежное помещение дыма, возникающего в большом помещении, воздух из смежного помещения должен подаваться с достаточной скоростью, чтобы средняя скорость воздуха в проёме, ведущем в большое помещение, была больше минимального предела [т.е. предела средней скоро-

сти (v_e) согласно уравнению (12)]. Можно выделить два случая. В одном случае, проём, ведущий в смежное помещение, располагается ниже уровня границы дымового слоя, и смежное помещение подвергается влиянию дыма от струи у края периметра свободного пространства. В таком случае предельная средняя скорость может быть вычислена по формуле:

$$v_e = 0{,}057[Q/z]^{1/3} \quad (12)$$

где

v_e – предельная средняя скорость, м/с;

Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт;

z – расстояние от основания огня до низа проёма, м (см. рис.3.13.2).

Предельная средняя скорость (v_e) не должна превышать 1 м/с. Данное уравнение не следует применять, когда z < 3,05 м. В другом случае, проём, ведущий в смежное помещение, располагается выше уровня границы дымового слоя, и тогда для вычисления предельной средней скорости используется уравнение (12) (с условием $v = v_e$), где $T_f — T_0$ является значением ΔT из таблицы 3.5 и $T_f = \Delta T + T_0$.

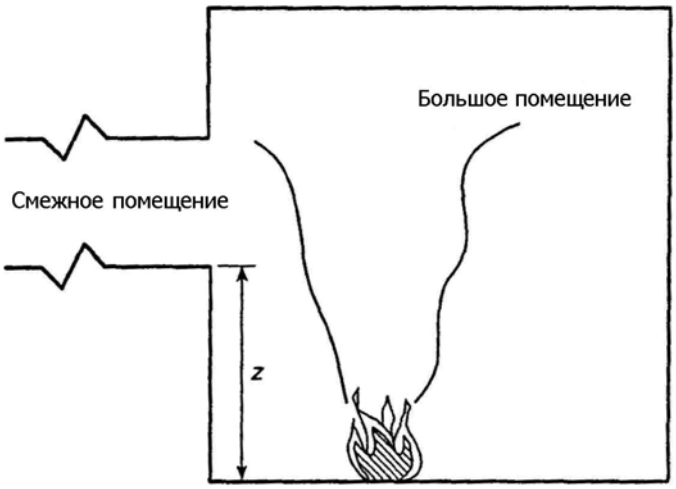


Рис. 3.13.2 Измерение расстояния от основания огня до низа проёма

ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ

При выборе системы противодымной защиты необходимо учитывать динамику, плавучесть, струю и стратификацию при потенциальном пожаре, а также ширину и высоту большого помещения. Как правило, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, спроектированные для этих помещений, не имеют возможности использоваться в качестве систем противодымной защиты, и вентиляционные решётки подачи воздуха и дымоудаления расположены не в тех местах, где положено для систем противодымной защиты. В связи с этим, в большинстве случаев следует рассмотреть вопрос установки специализированной системы противодымной защиты.

По данным из отчётов, некоторые существующие большие помещения, имеющие стеклянные стены или застеклённую крышу, нагреваются до 93°C под воздействием солнечных нагрузок. Строительные материалы, расположенные в таких зонах, должны быть способны выдерживать такие условия нагрева.

Вытяжные вентиляторы

Необходимо подобрать такие вытяжные вентиляторы, которые смогут функционировать в расчётных пожарных и дымовых условиях. Хотя при смешивании с окружающим воздухом может происходить значительное снижение температуры дыма, в некоторых случаях огонь может оказывать прямое воздействие на оборудование.

Система подачи очищенного воздуха

Самый простой способ подачи свежего воздуха в помещение – это его поступление через проёмы, ведущие наружу, такие как двери и вентиляционные решётки, которые могут открываться при активации системы. Такие проёмы могут быть соотнесены с архитектурным проектом и расположены в соответствии с требованиями ниже расчётного дымового слоя. В местах, где такие проёмы располагать непрактично, следует рассмотреть возможность установки механической вентиляции. Этой системой может стать и адаптированный проект системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, если мощности и скорости системы, а также расположение выпускных вентиляционных решёток являются подходящими. Для таких систем необходимо обеспечить средства, предотвращающие работу систем подачи воздуха до момента, когда вытяжной поток установится, чтобы избежать повышения давления в зоне пожара. Для тех мест, где среда такова, что ущерб помещению или его содержимому может оказаться значительным во время испытаний или частого случайного функционирования системы, следует рассмотреть возможность нагревания очищенного воздуха.

Системы управления

В основе любой системы противодымной защиты должна быть простота. Сложных систем следует избегать, поскольку с такими системами может происходить путаница, они могут быть неправильно установлены, некорректно протестированы, иметь низкий уровень надёжности, и им может быть не обеспечено необходимое техническое обслуживание и ремонт.

Система управления должна полностью координировать взаимоблокировку и области взаимодействия системы противодымной защиты с системой, извещающей о пожаре, спринклерной системой, системой отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и другими сопряжёнными системами.

Средства управления системой отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха должны включать в себя режим противодымной защиты, который должен быть самым приоритетным среди других режимов управления.

Активация системы противодымной защиты должна происходить немедленно после получения соответствующей команды об активации. Система противодымной защиты должна активировать отдельные компоненты, такие как клапаны и вентиляторы, в той последовательности, которая необходима для предотвращения физического ущерба оборудованию. Также следует уделить особое внимание остановке работы оборудования в надлежащем порядке, поскольку до окончательной остановки некоторых вентиляторов проходит большое количество времени, и закрытие клапанов при воздушном потоке может привести к серьёзному ущербу. Суммарное время отклика системы, включая время необходимое на обнаружение пожара, выключение функционирующего оборудования и активацию системы противодымной защиты, должно учитывать, что система должна войти в режим полной работоспособности до того, как условия в помещении выйдут за пределы расчётных дымовых условий.

Необходимо обеспечить возможность проверки каждой из систем, чтобы убедиться, что при активации система будет функционировать нормально. Методы и частотность зависят от сложности и важности системы. Проверка может включать в себя:

(1) комплексную проверку электропроводки, оборудования и устройств методом самодиагностики, который включает обеспечение положительного подтверждения при активации, периодическом тестировании и работе в режиме ручного управления;

(2) проверку наличия рабочей мощности ниже всех разрывов цепи;

(3) положительное подтверждение активации вентилятора при помощи давления в вентиляционном канале, воздушного потока или соответствующих датчиков, срабатывающих при потере рабочей мощности; сбои в разводке цепи управления или цепи энергоснабжения; ограничения воздушного потока; отказ ремня, приводной муфты или самого двигателя;

(4) положительное подтверждение работы дымозащитного клапана путём установления контакта, приближения или при помощи соответствующих датчиков, срабатывающих при потере рабочей мощности или сжатом воздухе; неисправности в цепи управления, цепи энергоснабжения или пневмолиниях; отказ привода дымозащитного клапана, соединений или самого дымозащитного клапана;

(5) другие средства или методы (при необходимости).

В пунктах (1) - (4) приведены некоторые методы, которые могут использоваться как по отдельности, так и в комбинации для проверки работы всех компонентов управления и оборудования. Например, может быть осуществлён традиционный контроль (электрическим методом) для проверки целостности проводников от приёмно-контрольного прибора системы пожарной сигнализации к релейному выключателю, расположенному на расстоянии 1 метра от входного устройства системы управления, а комплексная проверка может быть проведена для оценки работы от входного устройства системы управления до желаемого конечного результата. Если используются разные системы для проверки разных компонентов цепи управления и контролируемого оборудования, или и того и другого, то каждая из систем должна указывать на условия сбоя по соответствующему ей сегменту.

Комплексная проверка отслеживает как электрические, так и механические компоненты системы дымоудаления. Комплексная проверка дает положительное подтверждение, что желаемый результат был достигнут в течение времени, когда управляемое устройство было активировано. Задачи комплексной проверки выходят за рамки выявления сбоев в цепи, в них входит подтвердить, был ли достигнут желаемый результат (то есть, воздушный поток или положение клапана). Таким образом, подлинная комплексная проверка требует сопоставления желаемых результатов функционирования с фактическими конечными результатами.

Разрыв в цепи управления, отказ ремня вентилятора, размыкание приводной муфты, засорение воздушного фильтра, отказ двигателя или другие аварийные условия, которые могут препятствовать нормальному функционированию, не могут указывать на сбой, пока управляемое устройство не активировано, следовательно, измеряемый результат в это время соответствует ожидаемому результату. Если какое-либо условие, препятствующее нормальному функционированию, сохраняется в течение последующей активации устройства, тогда должен быть зафиксирован сбой.

Ручное управление всеми системами должно обеспечиваться из централизованного пункта управления. Такое управление должно быть способным блокировать взаимосвязанные элементы, встроенные в систему, находящуюся под автоматическим управлением.

Электроснабжение

Стандартное энергоснабжение для работы систем кондиционирования воздуха обычно бывает достаточно надёжным для неспециализированных систем зонного дымоудаления. Для систем дымоудаления и систем

управления ими следует рассмотреть вопрос о том, существует ли необходимость в наличии источника резервного питания.

Материалы, узлы и детали оборудования

Необходимо выбрать материалы воздуховодов и спроектировать воздуховоды так, чтобы они перемещали дым, были устойчивыми к дополнительному давлению (как положительному, так и отрицательному) от приточных и вытяжных вентиляторов при работе в режиме дымоудаления и сохраняли свою структурную целостность в течение предполагаемого периода функционирования системы.

Оборудование (включая, но не ограничиваясь вентиляторами, воздуховодами и балансирующими клапанами) должно подходить целям его предполагаемого использования и температурам, воздействию которых оно может быть подвергнуто.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ

В данном разделе представлены рекомендации по испытанию систем противодымной защиты. Каждая система должна быть испытана на соответствие критериям проектирования. Описанные ниже методы испытаний поделены на следующие три категории:

(1) испытания компонентов системы;
(2) приёмочные испытания;
(3) периодические испытания и техническое обслуживание.

Рекомендуется, чтобы представители заказчика, проектировщика и надзорного органа встретились на этапе планирования проекта для обмена идеями и обсуждения задач проектирования системы противодымной защиты, а также согласования критериев проектирования системы и прохождения эксплуатационных испытаний. Такое согласование помогает предотвратить многочисленные проблемы, возникающие в ходе итоговых приёмочных испытаний, и помогает пройти процедуру сдачи здания в эксплуатацию.

Контрактная документация должна включать в себя все приёмочные испытания, чтобы все стороны имели чёткое представление о задачах системы, процедурах проведения испытаний и критериях их прохождения.

Испытания компонентов системы

Задачей испытания компонентов системы является подтвердить, что итоговая установка соответствует заданному проекту, функционирует надлежащим образом и готова к прохождению приёмочных испытаний. Сторона, ответственная за проведение испытаний, должна быть чётко определена до проведения испытаний компонентов системы.

Перед началом проведения испытаний сторона, ответственная за данное испытание, должна проверить законченность строительства здания, включая следующие архитектурные детали:

(1) целостность любой перегородки, перекрытия или другого элемента, предназначенного для предотвращения прохождения дыма;
(2) противопожарные преграды;
(3) двери и запорные устройства;
(4) остекление, ограждающее большое помещение.

Испытания в реальных условиях каждого отдельного компонента системы должно выполняться по мере завершения его изготовления. Эти испытания в реальных условиях, как правило, выполняются разными производителями перед тем, как происходит соединение компонентов в единую систему противодымной защиты. В письменном виде должно быть зафиксировано, что установка каждого отдельного компонента завершена, и компонент функционирует нормально. Испытание каждого компонента (включая такие параметры как скорость, объём, калибровка чувствительности, электрическое напряжение и амперная нагрузка) должно быть задокументировано.

Испытание должно включать следующие подсистемы (с учётом той степени, в какой они влияют на работу системы противодымной защиты, либо она влияет на них):

(1) система пожарной сигнализации;
(2) система управления энергоснабжением;
(3) система управления зданием;
(4) система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
(5) электрооборудование;
(6) система регулирования температуры;
(7) источники питания;
(8) резервное питание;
(9) системы автоматического пожаротушения;
(10) двери и запорные устройства, срабатывающие автоматически;
(11) иные системы дымоудаления;
(12) аварийный лифт.

Приёмочные испытания

Задачей приёмочных испытаний является продемонстрировать, что итоговая установка комплексной системы соответствует конкретному проекту и функционирует должным образом. Для проведения приёмочных испытаний необходимо присутствие представителей одной или более сторон:

(1) надзорный орган;

(2) заказчик;
(3) проектировщик.

Вся документация по испытаниям компонентов системы должна быть доступна для инспектирования.

Параметры испытаний

Во время приёмочных испытаний следует измерить следующие параметры:

(1) суммарный объёмный расход;
(2) скорости воздушного потока;
(3) направление воздушного потока;
(4) усилие для открывания дверей;
(5) перепад давлений;
(6) температура окружающей среды.

Стендовое оборудование

Для проведения приёмочных испытаний может потребоваться следующее оборудование:

(1) дифференциальные манометры, наклонные водяные манометры или электронные манометры [диапазон измерений от 0 до 62,5 Па и от 0 до 125 Па с трубками 15,2 м];
(2) динамометр для измерения усилия открывания дверей;
(3) анемометр;
(4) амперметр;
(5) дверные клинья;
(6) рулон тонкой бумаги (салфеток) или иной удобный инструмент для указания направления воздушного потока;
(7) таблички с указанием, что проходит испытание системы противодымной защиты, и что двери открывать нельзя;
(8) несколько переносных раций (их применение целесообразно для помощи в координировании работы оборудования и регистрации данных).

Процедура проведения испытаний

Перед началом приёмочных испытаний всё оборудование в здании должно быть переведено в режим нормальной работы, включая оборудование, которое не используется для противодымной защиты, например, вытяжная вентиляция в туалетах, вентиляционные отверстия в шахтах лифтов, вентиляторы в лифтовых и иные аналогичные системы.

Скорость и направление ветра и температура воздуха снаружи должны регистрироваться каждый день испытаний. Если условия меняются в значительной степени в ходе испытаний, новые условия также должны быть зарегистрированы.

Если для работы системы противодымной защиты предусмотрено резервное питание, то приёмочные испытания должны проводиться как при обычном, так и при резервном питании. Для моделирования реальных эксплуатационных условий в этом режиме необходимо отключить обычное энергоснабжение здания.

Приёмочные испытания должны продемонстрировать, что для каждого заданного входного параметра получены предусмотренные выходные данные по каждой из заданных последовательностей управления. Следует рассмотреть следующие последовательности управления, чтобы продемонстрировать полную последовательность управления системой противодымной защиты:

(1) обычный режим;
(2) автоматический режим противодымной защиты по первому срабатыванию пожарной сигнализации;
(3) ручная корректировка обычного и автоматического режимов противодымной защиты;
(4) возврат к обычному режиму.

Допускается проведение приёмочных испытаний системы пожарной сигнализации в сочетании с системой противодымной защиты. Одна или более цепей системы пожарной сигнализации могут подать однократный входной сигнал системе противодымной защиты. В связи с этим, следует рассмотреть вопрос об установке соответствующего числа пусковых устройств и их цепей для демонстрации работы системы противодымной защиты.

Системы противодымной защиты в больших помещениях

Большие помещения могут быть разных конфигураций, каждая из которых имеет свои особенности. Они могут быть высокими и узкими или низкими и широкими; иметь балконы и взаимосвязанные этажи; открытое или закрытое соединение со смежными этажами; коридоры и лестницы для эвакуации или только наружные стены и окна; и быть частью гостиницы, больницы, торгового центра или спорткомплекса. В каждом случае должны быть разработаны конкретные критерии противодымной защиты.

Необходимо проверить точное расположение внешних границ каждой из систем противодымной защиты в большом помещении, определить все дверные проёмы, ведущие в это помещение и все смежные зоны, которые должны оставаться открытыми и будут защищаться только с помощью воздушного потока. Для больших проёмов должна быть измерена средняя скорость посредством соответствующего распределения скоростей по поперечному сечению потока.

При работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в обычном режиме необходимо измерить разность давлений по обе стороны дверей и скорости воздушных потоков на границах с открытыми пространствами. Пользуясь динамометром, определите усилие, необходимое для открывания каждой двери.

Активируйте систему противодымной защиты. Проверьте и зарегистрируйте работу всех вентиляторов, клапанов, дверей и комплектующего оборудования. Измерьте вытяжные мощности вентиляторов и скорости воздуха через створки воздухозаборника и вентиляционные решётки или приточные решётки при наличии механической приточной вентиляции. Измерьте усилие для открытия входных дверей.

Измерьте и зарегистрируйте разность давлений по обе стороны всех дверей, которые отделяют зону системы противодымной защиты от смежных помещений и скоростей на границах с открытыми пространствами.

Другие методы испытаний

Описанные выше методы испытаний предназначены обеспечить соответствующие средства для оценки функционирования системы противодымной защиты. Другие методы испытаний применялись ранее в случаях, когда надзорный орган требовал проведения дополнительных испытаний. Эти методы испытаний имеют ограниченное значение для оценки функционирования конкретной системы противодымной защиты и их надёжность вызывает сомнения.

Как описано в предыдущих главах, динамика дымовой струи, подъёмные силы и стратификация дыма являются основными определяющими элементами при проектировании системы противодымной защиты. Следовательно, для того чтобы должным образом испытать систему, наиболее подходящим и эффективным испытанием является испытание в условиях реального пожара. Существует, однако, множество веских причин, по которым проводить такое испытание в законченном здании нерационально. Испытание в условиях реального пожара может быть опасным, и обычно такие испытания проводить не следует. Приёмочные испытания в условиях пожара несут реальную опасность для жизни и имущества, обусловленную количеством выделяемого тепла и токсичностью дыма. В качестве альтернативы может выступить любой другой тип испытания. Если же проведение такого испытания системы противодымной защиты предписано надзорным органом в целях приёма здания в эксплуатацию, данный тип испытания принимается за основу проектирования, и тогда имитация какого-либо условия реального пожара недопустима, поскольку она может привести к ложному представлению о безопасности и надёжности работы системы противодымной защиты при пожаре.

Испытания с помощью дымовых шашек не дают той температуры, подъёмной силы и вовлечения воздуха в струю, которые бывают в условиях реального пожара, и непригодны при оценке действительного функционирования системы. Система, спроектированная в соответствии с данным руководством и способная обеспечивать намеченную противодымную защиту, может не пройти испытания с применением дымовых шашек. И наоборот, есть вероятность, что система неспособная обеспечивать намеченную противодымную защиту, покажет хорошие результаты при испытании с применением дымовых шашек. Из-за нерациональности проведения испытаний в условиях реального пожара приёмочные испытания, описанные в данном документе, направлены на те аспекты систем противодымной защиты, соответствие которых критериям может быть подтверждено путём проверки достоверности.

Документация по испытаниям

По завершении приёмочных испытаний экземпляр всей документации по испытаниям функционирования системы должен быть предоставлен заказчику. Эта документация должна быть доступна при проведении периодических испытаний, технического обслуживания и ремонта.

Руководства пользователя и инструктаж для заказчика

Заказчику должна быть предоставлена информация, характеризующая работу, техническое обслуживание и ремонт системы. Базовый инструктаж по эксплуатации системы должен быть проведён с представителями заказчика. Поскольку по окончании приёмочных испытаний заказчик может брать ответственность за эффективное использование системы противодымной защиты на себя, базовый инструктаж должен быть проведён до их начала.

Приёмка в эксплуатацию и пользование готовой частью строительного объекта

Для получения акта приёмки здания в эксплуатацию приёмочные испытания должны быть проведены за один этап. Тем не менее, если предстоит поэтапное строительство или заселение здания, приёмочные испытания систем проводятся по каждому этапу для получения временных актов приёмки.

Изменения в проекте

Все эксплуатационные и приёмочные испытания должны быть проведены на соответствующей части системы в том случае, если она подверглась изменениям или преобразованиям. В документацию должны быть внесены соответствующие обновления, отражающие информацию об изменениях и преобразованиях.

Периодические испытания

Во время эксплуатации здания необходимо проводить техническое обслуживание, чтобы удостовериться в том, что система противодымной защиты способна выполнять намеченную функцию в условиях пожара. Надлежащее техническое обслуживание должно, как минимум, включать в себя периодические испытания оборудования, такого как пусковые устройства, вентиляторы, клапаны, элементы управления, двери и окна. Оборудование должно проходить техническое обслуживание в соответствии с рекомендациями производителя.

Периодические испытания должны подтверждать, что установленные системы продолжают функционировать в соответствии с утверждённым проектом. Предпочтительно включить в испытания как измерение свойств воздушного потока, так и перепады давлений в следующих местах:

(1) по обе стороны проёмов дымозащитных преград;

(2) на источниках приточного воздуха;

(3) на вытяжном оборудовании.

Все точки сбора данных должны совпадать с их расположением при приёмочных испытаниях для того, чтобы облегчить сравнение измерений.

Система должна проходить испытания, по крайней мере, раз в полгода. Испытания должны проводиться лицами, компетентными в вопросах эксплуатации, тестирования, технического обслуживания и ремонта систем. Результаты испытаний должны быть задокументированы в журнале эксплуатации и технического обслуживания и должны быть доступны для проверки. Работа системы противодымной защиты должна быть проверена по каждой из комбинаций текущих расчётных показателей. Необходимо отслеживать правильность выходных данных по каждому заданному входному параметру. Если необходимо, испытания также должны быть проведены с использованием резервного питания.

Особые меры могут потребоваться для внедрения больших объёмов наружного воздуха в арендуемые помещения или компьютерные центры, когда температура воздуха снаружи и влажность достигают предельных значений и такой неудовлетворяющий требованиям воздух может нанести ущерб содержимому помещения. Поскольку системы противодымной защиты могут блокировать элементы управления предельными параметрами, такие как морозозащитные термостаты, испытания следует проводить, когда состояние наружного воздуха не нанесёт ущерба оборудованию и системам.

СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Расчёт положения дымового слоя

Компьютерная модель (написанная на языке программирования или использующая электронную таблицу) может быть разработана на основе алгебраических уравнений, содержащихся в разделе «Методы расчёта», для вычисления уровня границы дымового слоя при наличии и при отсутствии дымоудаления. Данный подход включает в себя расчёт массового расхода дыма, поступающего в дымовой слой, температуру дыма, поступающего в дымовой слой и массовый расход дыма, удаляемого из дымового слоя при механической или аэрационной вентиляции. Шаги по расчёту уровня границы дымового слоя следующие:

(1) Выберите временной шаг для расчёта, Δt.

(2) Определите расчётный пожар (например, стационарный, растущий, растущий с постоянным порогом мощности или другое описание скорости выделения тепла как функции времени).

(3) Вычислите или задайте скорость выделения тепла при расчётном пожаре, Q, при текущем временно́м шаге, а также конвективную теплоотдачу, Q_c.

(4) Вычислите массовый расход дыма, поступающего в дымовой слой за текущий временной шаг. Для осесимметричной струи массовый расход струи следует вычислять на основе уравнения (8) или уравнения (9) в зависимости от положения дымового слоя на конец предыдущего временно́го шага по отношению к высоте пламени расчётного пожара. Для балконной растекающейся струи, расход массы струи следует вычислять на основе уравнения (13.17), для оконной струи – на основе уравнений (13.20), (13.21) и (13.23). Для нестационарного пожара расход массы вычисляется при скорости выделения тепла в средней точке временно́го шага.

(5) Вычислите температуру дыма, поступающего в дымовой слой на основе уравнения (13.25).

(6) Вычислите массу дыма в дымовом слое на конец этого временно́го шага.

$$M_2 = M_1 + (m_2 - m_1)\Delta t$$

где

M_2 – масса дыма в дымовом слое на конец текущего дымового шага, кг;

M_1 – масса дыма в дымовом слое на начало текущего дымового шага, кг;

m_2 – массовый расход струи, кг/с;

m_1 – массовый расход дымоудаления, кг/с;

Δt – временной шаг, с.

(7) Вычислите новую температуру дымового слоя на основании сохранения энергии.

$$T_{s,2} = T_{s,1} + \left[(1-\eta)m_p(T_p - T_0) - m_e(T_s - T_0) - (T_s - T_0)(m_p - m_e)\right]\frac{\Delta t}{M_1}$$

где

$T_{s.2}$ – температура дымового слоя на конец текущего временно́го шага, °C;

$T_{s.1}$ – температура дымового слоя на начало текущего временно́го шага, °C;

T_p – температура струи, °C;

T_0 – температура окружающей среды, °C;

η – доля теплопотери (безразмерная величина);

M_p – массовый расход струи, кг/с;

M_e – массовый расход дымоудаления, кг/с.

Доля теплопотери – это доля конвективной теплоотдачи, поступающей из дымового слоя к потолку и стенам и имеющая максимальное значение 1,0. Максимальное повышение температуры происходит в случае, когда доля теплопотери равна нулю.

(8) Вычислите плотность дымового слоя:

$$\rho_s = \frac{1{,}2(T_0 + 273)}{T_2 + 273}$$

где ρ_s – плотность дымового слоя на конец временного шага, кг/м^3.

(9) Вычислите объём дымового слоя:

$$V_2 = \frac{M_2}{\rho_s}$$

где V_2 – объём дымового слоя на конец временно́го шага, м^3.

(10) Определите новый уровень границы дымового слоя как функцию объёма верхнего слоя и геометрии дымового резервуара. Для постоянных площадей поперечного сечения уровень дымового слоя рассчитывается по формуле:

$$z_2 = H_{потолок} - \frac{V_2}{A_{резервуар}}$$

где

z_2 – высота границы дымового слоя от уровня пола, м;

$H_{потолок}$ – высота потолка, м;

$A_{резервуар}$ – площадь резервуара, м^2.

(11) Прекратите вычисления, если достигнуто максимальное количество временных шагов, либо если граница дымового слоя находится на уровне верхней границы топлива или ниже её.

(12) Вернитесь к шагу (3) и используйте полученные в результате вычислений значения для расчётов следующего временно́го шага.

Соотношения масштабирования

Безразмерные группы могут быть выражены в виде формулы для ситуации, в которой есть источник нагревания, представляющий огонь, а также вытяжные и приточные вентиляторы с заданным объёмным расходом. Соотношение температуры газа (*T*), скорости *(v),* давления (*p*) и температуры поверхности (T_s), выраженное в безразмерных членах и в виде функции *x, y, z* и времени *(t),* составляет:

$$\left\{ \begin{array}{c} \dfrac{T}{T_0} \\ \dfrac{v}{\sqrt{gl}} \\ \dfrac{p}{\rho_0 gl} \\ \dfrac{T_s}{T_0} \end{array} \right\} = f\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \frac{t}{\sqrt{l/g}}, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3 \right)$$

где

l – характеристическая длина;

g – ускорение силы тяжести;

T_0 – температура окружающей среды;

ρ_0 – плотность окружающей среды.

Π_1, Π_2 *и* Π_3 являются безразмерными группами, происходящими из выделения энергии при пожаре, потоков от вентиляторов и теплопередачи стенам:

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{gl}^{5/2}} \sim \frac{энергия\ \ пожара}{энергия\ \ потока}$$

где

Q – скорость выделения энергии при пожаре;

c_p – удельная теплоёмкость окружающего воздуха.

$$\Pi_2 = \frac{V_{fan}}{\sqrt{gl}^{5/2}} \sim \frac{поток \quad от \quad вентиляторов}{плавучий \quad поток}$$

где V_{fan} – объёмный расход вытяжного вентилятора.

$$\Pi_3 = \frac{1}{(k\rho c)_w}\left\{\frac{\rho_0}{\mu}\right\}^{1,6} g^{0,3}k^2 l^{0,9} \sim \frac{конвективная \quad теплопередача}{теплопередача \quad стенам}$$

где

$(kpc)_w$– термические свойства (теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость) стены;

μ – вязкость газа;

k – удельная теплопроводность газа.

Выражение Π_3 применимо к термически толстому материалу конструкции. Дополнительные безразмерные члены (Π_S) необходимы, если важны толщина стены и влияние теплового излучения. Π_3 вводит поправку на тепловые потери у границы, допуская использование другого материала конструкции в масштабной модели в целях сохранения равновесия с учётом тепловых потерь.

Для типового здания рекомендуемое минимальное геометрическое масштабирование должно быть 1:8.

Выражение масштабирования для скорости выделения тепла следует из сохранения Π_1. Аналогичным образом, выражения для объёмного расхода воздуха при дымоудалении и термических свойств стены получены при сохранении Π_2 и Π_3. Условие термических свойств стены легко удовлетворяется посредством выбора такого материала конструкции, который является невозгораемым и наиболее точно соответствует $(kpc)_w$ материала достаточной толщины для поддержания условия о термически толстом материале.

Приведённые ниже примеры дают представление о том, как использовать соотношения масштабирования при моделировании по Фруду.

Пример 1. Какую масштабную модель следует использовать для молла, если минимальная рассматриваемая зона, равная 3 м, является высотой от пола до потолка на балконах?

Обратите внимание на то, что поток в модели должен быть полностью развившимся турбулентным потоком. Чтобы достичь этого, предлагается, чтобы рассматриваемые зоны в масштабной модели были, по крайней мере, равны 0,3 м. Соответствующая высота модели от пола до потолка должна составлять, по крайней мере, 0,3 м. Условие $l_m = 0{,}3м$ и $l_F = 3м$, тогда $l_m / l_F = 0{,}1$. Следовательно, модель может быть в масштабе 1:10.

Пример 2. Расчётный пожар для конкретного помещения является пожаром с постоянной скоростью выделения тепла 5000 кВт. Какая мощность пожара необходима для модели в масштабе 1:10?

$$\frac{l_m}{l_F} = 0{,}1$$

$$Q_m = Q_F\left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{5/2} = 5000(0{,}1)^{5/2} = 15{,}8 \quad кВт$$

Пример 3. Если для полномасштабного помещения объёмный расход воздуха при дымоудалении составляет 250 м^3/с, каков будет расход воздуха при дымоудалении для модели масштаба 1:10?

$$V_{fan,m} = V_{fan,F}\left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{5/2} = 250(0{,}1)^{5/2} = 7{,}9м^3/с$$

Пример 4. Стены в полномасштабном помещении выполнены из бетона. Каково влияние стен модели в масштабе 1:10, выполненных из гипсокартона?

$k\rho c$ кирпича составляет 1,7 кВт^2/м$^{-4}$•К$^{-2}$•с.

Наиболее подходящие термические свойства модели могут быть вычислены следующим образом:

$$(k\rho c)_{w,m} = (k\rho c)_{w,F}\left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{0,9} = (1{,}7)(0{,}1)^{0,9} = 0{,}21 \quad \left(кВт^2 / м^{-4} \cdot К^{-2} \cdot с\right)$$

Значение термических свойств гипсокартона равно 0,18 кВт^2/м$^{-4}$•К$^{-2}$•с, что является близким к наиболее подходящему значению, полученному выше, т.е. в модели можно использовать гипсокартон. Следует отметить, что использование стеклянных стен для видео и фотосъёмки является более важным, чем масштабирование термических свойств.

Пример 5. В модели масштабом 1:10 наблюдались следующие значения чистых высот: 2,5 м через 26 с, 1,5 м через 85 с и 1,0 м через 152 с. Каковы соответствующие значения чистых высот для полномасштабного помещения?

Для первой пары значений чистой высоты и времени, где z_m = 2,5 м и t_m = 26 с:

$$z_F = z_m\left(\frac{l_F}{l_m}\right) = 2{,}5(10/1) = 25 \quad м$$

и

$$t_F = t_m\left(\frac{l_F}{l_m}\right)^{1/2} = 26(10/1)^{1/2} = 82 \quad c$$

Для других пар чистой высоты и времени, представленных ниже, расчёт осуществляется аналогичным образом.

Чистая высота, м	**Время, с**	**Чистая высота, м**	**Время, с**
2,5	26	25	82
1,5	85	15	269
1,0	152	10	480

Расчёт концентрации газов и снижения видимости при пожаре

В целях проектирования вопрос об алгебраических уравнениях для концентрации газов и снижения видимости может касаться двух крайних случаев:

(1) сценарий заполнения дымом, где используется допущение, что все продукты сгорания аккумулируются в опускающемся дымовом слое;

(2) сценарий регулируемого вентиляцией квазистационарного пожара, где существует квазиустойчивое равновесие между скоростями потоков, входящими в дымовой слой и выходящими из него.

Как правило, сценарий регулируемого вентиляцией квазистационарного пожара представляет интерес в целях проектирования, потому что этот сценарий представляет квазистационарные условия, которые развиваются при работе системы дымоудаления. Сценарий заполнения дымом может представлять интерес для анализа условий, которые могут развиться до активации системы дымоудаления. Существует переходный период между этими двумя крайними случаями. Во время этого переходного промежуточного периода происходит как наполнение дымового слоя, так и удаление дыма из него. Расчёт этого переходного периода, как правило, требует использования численных подходов с применением компьютера. С позиции проектирования этот период несущественен, поскольку это не крайний случай, поэтому здесь он более подробно не рассматривается.

Для анализа состава газа и оптических характеристик в двух крайних случаях могут использоваться некоторые алгебраические уравнения. Сами по себе уравнения являются точными, но данные, используемые в этих уравнениях, неточны. Пользователь должен быть предупреждён об этих неопределённостях.

Этап заполнения дымом: анализ оптических свойств

Средняя оптическая плотность опускающегося дымового слоя может быть определена, если достаточно точно удастся определить массовую оптическую плотность топлива. Уравнение (A.1) используется для определения оптической плотности как функции массовой оптической плотности, массы потребляемого топлива и объёма дымового слоя.

$$D = \frac{D_m m_f}{V_u} = \frac{D_m \int_0^t \dot{m}_f dt}{A z_u(t)} \qquad \text{(A.1)}$$

где

D_m – массовая оптическая плотность, м^2/кг;

$\dot{m}_f$ – скорость горения топлива, кг/с;

m_f – суммарная потребляемая масса топлива, кг;

A – площадь горизонтального поперечного сечения атриума, м^2;

z_u – толщина верхнего слоя, м;

V_u – объём верхнего слоя, м^3.

При плоском потолке, незначительной площади струи и пожаре с постоянным массовым расходом и постоянной скоростью выделения тепла, уравнение (A.1) преобразуется в:

$$D = \frac{D_m Q t}{\chi_a \Delta H_c A_u H}\left[1-\left(1+\frac{2t}{3\tau}\right)^{-3/2}\right]^{-1} \quad \text{(A.2)}$$

$$\tau = \frac{V}{V_{ent}} = \frac{AH}{k_v Q^{1/3} H^{5/3}} = \frac{AH}{k_v \left(\alpha_n t^n\right)^{1/3} H^{5/3}} \quad \text{(A.3)}$$

где
V – объём атриума, м^3;
V_{ent} – объёмный расход вовлечения воздуха, м^3/с;
k_v – постоянная объёмного вовлечения воздуха (0,064 м$^{4/3}$/кВт$^{1/3}$с);
Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт;
ΔH_c – теплота сгорания, кДж/кг;
H – высота потолка, м;
χ_a – полнота сгорания.

При плоском потолке, незначительной площади струи и квадратичном пожаре, уравнение (A.1) преобразуется в:

$$D = \frac{D_m \alpha t^3}{3\chi_a \Delta H_c AH}\left[1-\left(1+\frac{2k_v \alpha^{1/3} t^{5/3} H^{2/3}}{5A}\right)^{-3/2}\right]^{-1} \quad \text{(A.4)}$$

где α – скорость роста пожара = 1000/(t_g)^2, с.

При других сценариях соответствующие значения должны быть подставлены в уравнение (A.1). При некоторых сценариях может потребоваться численное интегрирование.

Этап заполнения дымом: анализ состава дымового слоя

Анализ состава дымового слоя во многом аналогичен анализу оптической плотности дымового слоя. Для расчёта состава дымового слоя как функции времени каждому из интересуемых продуктов горения *i* должен быть присвоен коэффициент выхода:

$$\dot{m}_i = f_i \dot{m}_f \quad \text{(A.5)}$$

где f_i – коэффициент выхода, кг*продуктов горения* / кг*топлива*.

Массовая доля, Y_i, каждого из продуктов горения в дымовом слое равна:

$$Y_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \quad \text{(A.6)}$$

где Y_i – массовая доля (кг$_{\text{продуктов горения}}$ / кг$_{\text{суммарное}}$).

Член в числителе уравнения (A.6) вычисляется по аналогии с уравнением (A.1):

$$m_i = \int_0^t \dot{m}_i dt = \int_0^t f_i \dot{m}_f dt = \int_0^t f_i \frac{Q}{\chi_a \Delta H_c} dt \quad \text{(A.7)}$$

При постоянном коэффициенте выхода и скорости роста квадратичного пожара уравнение (A.7) преобразуется в уравнение:

$$\dot{m}_i = f_i \int_0^t \frac{\alpha t^2}{\chi_a \Delta H_c} dt = \frac{f_i \alpha t^3}{3\chi_a \Delta H_c} \quad \text{(A.8)}$$

При постоянном коэффициенте выхода и стационарном пожаре уравнение (A.7) преобразуется в уравнение:

$$m_i = \int_0^t f_i \frac{Q}{\chi_\alpha \Delta H_c} dt = \frac{f_i Q t}{\chi_\alpha \Delta H_c} \quad \text{(A.9)}$$

Член в знаменателе уравнения (A.6) представляет суммарную массу дымового слоя. Как правило, выделяемая масса топлива ничтожно мала по сравнению с массой воздуха, вовлекаемого в дымовой слой, поэтому суммарная масса дымового слоя может быть приблизительно выражена следующим уравнением:

$$\sum_i m_i = \overline{\rho} V_u \frac{\rho_0 T_0 V_u}{T} \tag{A.10}$$

В случае, когда повышение температуры дымового слоя небольшое относительно абсолютной температуры окружающей среды (т.е. $\overline{T} / T_0 \approx 1$), уравнение (A.10) приобретает следующий вид:

$$\sum_i m_i = \rho_0 V_u \tag{A.11}$$

Подставив уравнения (A.8) и (A.11) в уравнение (A.6), получаем (для квадратичного пожара):

$$Y_i = \frac{f_i \alpha t^3}{3 \rho_0 V_u \chi_\alpha \Delta H_c} \tag{A.12}$$

Подставив уравнения (A.9) и(A.11) в уравнение (A.6), получаем (для стационарного пожара):

$$Y_i = \frac{f_i Q t}{\rho_0 V_u \chi_\alpha \Delta H_c} \tag{A.13}$$

Когда огонь разрастается как при квадратичном пожаре от $Q = 0$ в момент времени $t = 0$ до $Q = Q_{as}$ в момент времени $t = t_{as}$, а затем продолжает гореть неограниченно при $Q = Q_{as}$, уравнения (A.12) и (A.13) могут быть объединены следующим образом:

$$Y_i = \frac{f_i \left[\alpha t_{qs}^3 / 3 + Q_{qs} \left(t - t_{qs} \right) \right]}{\rho_0 V_u \chi_a \Delta H_c} \tag{A.14}$$

Объём дымового слоя, V_u, в этих уравнениях вычисляется на основе методов, представленных в подразделе «Массовая скорость дымообразования», и $V_u = A(H - z)$.

Регулируемый вентиляцией квазистационарный этап: анализ оптических свойств

При регулируемых вентиляцией квазистационарных условиях существует равновесие между скоростью притока массы в дымовой слой и скоростью оттока массы из дымового слоя. Средняя оптическая плотность дымового слоя может быть вычислена на основе скорости дымоудаления:

$$D = \frac{D_m \dot{m}_f}{V} = \frac{D_m Q}{\chi_a \Delta H_c V} \tag{A.15}$$

Уравнение (A.15) может использоваться для определения средней оптической плотности дымового слоя при заданной скорости дымоудаления. Как вариант, требуемую скорость дымоудаления, необходимую для получения определённой оптической плотности, D, можно определить, преобразовав уравнение (A.15):

$$V = \frac{D_m Q}{D \chi_a \Delta H_c} \tag{A.16}$$

Для применения уравнений (A.15) и (A.16) необходимо знать массовую оптическую плотность дыма, D_m.

Регулируемый вентиляцией квазистационарный этап: анализ состава дымового слоя

Массовая доля каждого из продуктов горения i в дымовом слое при условиях квазистационарного потока, как правило, определяется на основе уравнения:

$$Y_i = \frac{\dot{m}_1}{\sum_i \dot{m}_i} \tag{A.17}$$

При условиях квазистационарного потока массовый расход каждого из продуктов горения определяется как:

$$\dot{m}_i = f_i \dot{m}_f = f_i \frac{Q}{\chi_a \Delta H_c} \tag{A.18}$$

Суммарный массовый расход при квазистационарных условиях определяется на основе следующего уравнения:

$$\sum_i \dot{m}_i = \overline{\rho} V = \rho_0 V_{ent} = \rho_0 \left(V - V_{\exp} \right) \tag{A.19}$$

Подставив уравнения (A.18) и (A.19) в уравнение (A.17), можно вычислить массовую долю каждого из интересующих продуктов горения *i* , исходя из известной скорости дымоудаления.

$$Y_i - Y_{i,0} = \frac{f_i Q}{\rho_0 \chi_a \Delta H_c \left(V - V_{\exp} \right)} \tag{A.20}$$

Чтобы определить требуемую скорость дымоудаления, необходимую для ограничения массовой доли некоторых продуктов горения *i* до предельного значения, $Y_{\dot{v}}$, уравнение (A.26) преобразовывается в:

$$V = V_{\exp} + \frac{f_i Q}{\rho_0 \chi_a \Delta H_c \left(Y_i - Y_{i,0} \right)} \tag{A.21}$$

Объёмный расход расширения, $V_{\exp}$, вычисляется по уравнению:

$$V_{\exp} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p T_0} = \frac{\left(1 - \chi_i \right) Q}{\rho_0 c_p T_0} \tag{A.22}$$

Прогнозирующая способность уравнений

Уравнения (3) и (4) выведены эмпирическим путём и предназначены для определения положения границы дымового слоя в процессе заполнения помещения дымом. Данный обзор уравнений (3) и (4) разделён на две части:

(1) сравнение результатов вычислений по уравнениям (3) и (4) с результатами, полученными на основе теоретически выведенных уравнений (с постоянными, определёнными эмпирическим путём), далее называемыми уравнениями, используемыми в программе ASET;

(2) оценка прогнозирующей способности уравнения (3) и уравнения, используемого в программе ASET, путём сравнения результатов вычислений на основе уравнений с экспериментальными данными.

Сравнения с уравнениями, используемыми в программе ASET

Сравнение уравнений по заполнению дымом, приведённых в стандарте NFPA 92B [4], с уравнениями, используемыми в программе ASET, указывают на разницу между уравнениями, полученными эмпирическим путём, например, уравнениями (3) и (4), и уравнениями, основанными главным образом на теории.

Стационарные пожары

Теоретически обоснованное уравнение по заполнению дымом может быть выведено с использованием законов сохранения массы и энергии для определения дополнительного объёма, подаваемого в верхний слой. Используем соотношение по вовлечению воздуха в струю, выведенное исследователем Зукоски (Zukoski [33]):

$$\frac{z}{H} = \left[1 + \frac{2 k_v \left(t Q^{1/3} / H^{4/3} \right)}{3 \left(A / H^2 \right)} \right]^{-3/2} \tag{A.23}$$

где

z – высота границы дымового слоя, м;

H – высота потолка, м;

t – время от возгорания, с;

Q – скорость выделения тепла, кВт;

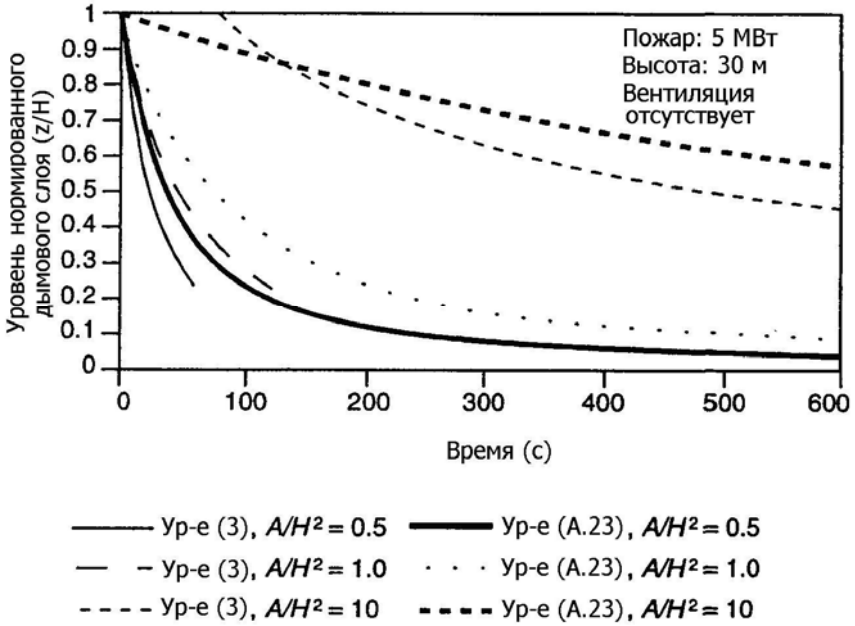
A – площадь поперечного сечения помещения, м^2;

k_v – постоянная вовлечения воздуха (0,064 м$^{4/3}$/(с-кВт$^{1/3}$)

Сравнение *z/H*, спрогнозированное уравнениями (3) и (A.23) представлено на рис.A.3.6.2.2(a), при высоте потолка 30 м, стационарном пожаре мощностью 5 МВт и широким диапазоном соотношений A/H^2. В целом, соответствие между этими двумя уравнениями является приемлемым. Уравнение (3) прогнозирует более низкую высоту границы дымового слоя в большинстве случаев, за исключением помещения большого объёма, представленного соотношением $A/H^2 = 10$. В данном случае уравнение (3) указывает на отставание приблизительно в 100 секунд до формирования дымового слоя, в то время как уравнение (A.23) свидетельствует о немедленном образовании дымового слоя. Такое отставание справедливо для помещения такого большого размера. Это временно́е отставание можно учесть, добавив дополнительный член в уравнение (A.23). Временно́е отставание в данном случае оценивается как равное 37 с при высоте 30 м и площади поперечного сечения 9000 м^2.

Хотя сравнение в рис.A.3.6.2.2(a) является эффективным, оно касается только выбранных значений *A, H и Q.* Это сравнение может быть применено ко всем значениям *A, H* и *Q*, образуя соотношение двух уравнений, выраженных исходя из t:

$$\frac{t_{eqnA.23}}{t_{eqn3}} = \frac{3}{2k_v} \frac{\left[\left(z/H\right)^{-2/3} - 1\right]}{\exp\left[\frac{1{,}11 - z/H}{0{,}28}\right]} \quad \text{(A.24)}$$



——— Ур-е (3), $A/H^2 = 0.5$ ——— Ур-е (A.23), $A/H^2 = 0.5$

— – Ур-е (3), $A/H^2 = 1.0$ · · · Ур-е (A.23), $A/H^2 = 1.0$

- - - - Ур-е (3), $A/H^2 = 10$ - - - - Ур-е (A.23), $A/H^2 = 10$

Рис. A.3.6.2.2 (a) Сопоставление алгебраических уравнений (3) и (A.23): стационарный пожар

На рис. A.3.6.2.2(b) показано соотношение коэффициента времени и нормированной глубины дымового слоя, *(H - z)/H*. Полное соответствие двух уравнений возможно при значении коэффициента времени, равном 1,0. Однако коэффициент времени существенно варьируется и находится в пределах 20% от 1,0 лишь для небольшого диапазона. При значениях нормированной глубины дымового слоя менее 0,13 (или нормированной чистой высоте, равной 0,87), уравнение (A.23) всегда прогнозирует более короткое время достижения определенной глубины, чем уравнение (3). И напротив, уравнение (3) прогнозирует более короткое время достижения любой нормированной глубины дымового слоя, превышающей значение 0,13.

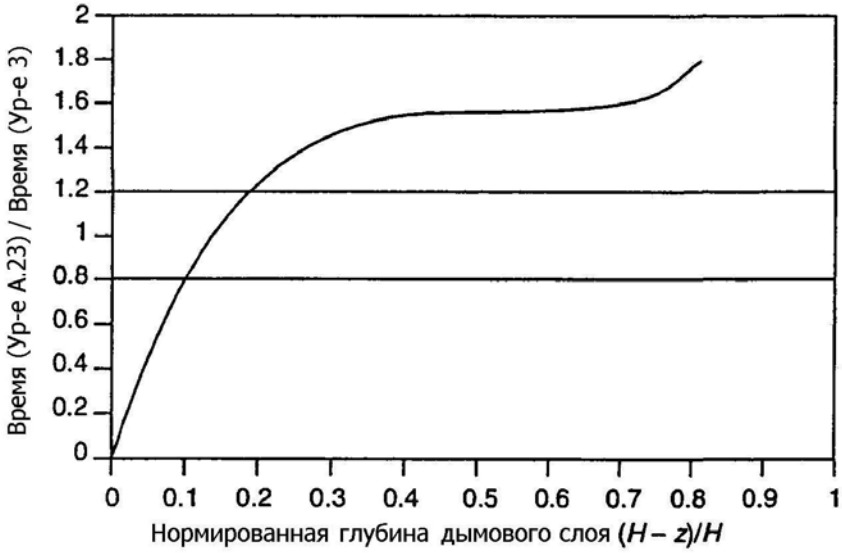


Рис. A.3.6.2.2(b) Сопоставление алгебраических уравнений (3) и (A.23): стационарный пожар

Коэффициент времени относительно индифферентен к значениям *(H-z)/ H,* колеблющимся от 0,4 до 0,6. В пределах этих значений коэффициент времени в среднем составляет 1,5, то есть, время, прогнозируемое уравнением (A.23) для получения определенной глубины дымового слоя на 50% превышает значение, прогнозируемое уравнением (3). При этом, уравнение (3) прогнозирует более быстрое понижение до этой глубины дымового слоя, чем уравнение (A.23).

Квадратичные пожары

Можно провести аналогичное сопоставление уравнения (4), полученного эмпирическим путём, и теоретически обоснованного уравнения для квадратичных пожаров. Ниже приведено уравнение, используемое в программе ASET:

$$\frac{z}{H} = \left(1 + \frac{20 k_v t^{5/3} / H^{-4/3}}{t_g^{2/3} A / H^2} \right)^{-3/2} \qquad \text{(A.25)}$$

где t_g = скорость роста пожара, с.

На рис. A.3.6.2.2(c) представлено сопоставление прогнозируемых значений z/H для высоты потолка 30 м, средней скорости развития пожара (t_g = 300 с) и различных значений A/H^2. При значениях A/H^2 до 1,0 совпадение является достаточно точным в момент после окончания формирования дымового слоя. С другой стороны, уравнение, полученное эмпирическим путем, в неявном виде учитывает временно́е отставание. При A/H^2 равном 10,0, задержка формирования дымового слоя занимает более длительное время, чем при меньших значениях соотношения A/H^2, таким образом, совпадение уровня границы дымового слоя достигается приблизительно после 800 секунд. Расчётное временно́е отставание составляет 206 секунд.

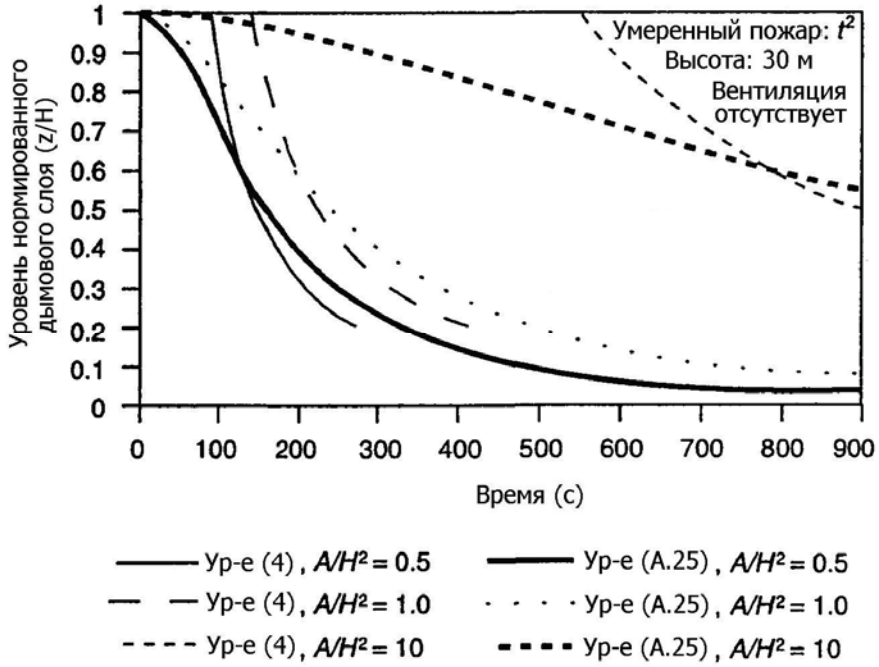


Рис. A.3.6.2.2(c) Сопоставление алгебраических уравнений (4) и (A.25): квадратичный пожар (t^2)

Значение z/H, равное 0,59 для точки пересечения различных кривых для обоих уравнений, является постоянным, независящим от значений A, H, и Q. Таким образом, уравнение (A.25) прогнозирует более короткое время для достижения определенного уровня границы дымового слоя при $z/H > 0{,}59$, в то время как уравнение (4) прогнозирует более короткое время при $z/H < 0{,}59$.

При различных экспонентах в правой части обоих уравнений их сравнение возможно только путем вычисления показателей времени и формирования соотношения:

$$\frac{t_{урав.A.25}}{t_{урав.4}} = \left[\frac{(0.91)^{-0.69}}{4 k_v^{-0.6}} \right] \left[\frac{[(z/H)^{-2/3} - 1]^{0.6}}{(z/H)^{-0.69}} \right] \qquad \text{(A.26)}$$

Соотношение коэффициента времени при различной нормированной глубине дымового слоя, *(H-z)/H*, представлено на рис. A.3.6.2.2(d). В целом, прогнозируемые показатели времени для квадратичных пожаров совпадают гораздо более точно, чем показатели времени для стационарных пожаров. Прогнозируемое время уравнения (A.25) находится в пределах 20% прогнозируемого времени уравнения (4) при значениях *(H-z)/H* от 0,26 до 0,80. Как и в случае со стационарными пожарами, коэффициент времени составляет меньше 1,0 при небольшой нормированной глубине дымового слоя. Однако, в данном случае, коэффициент времени не превышает 1,0 до тех пор, пока нормированная глубина дымового слоя не достигнет значения 0,40.

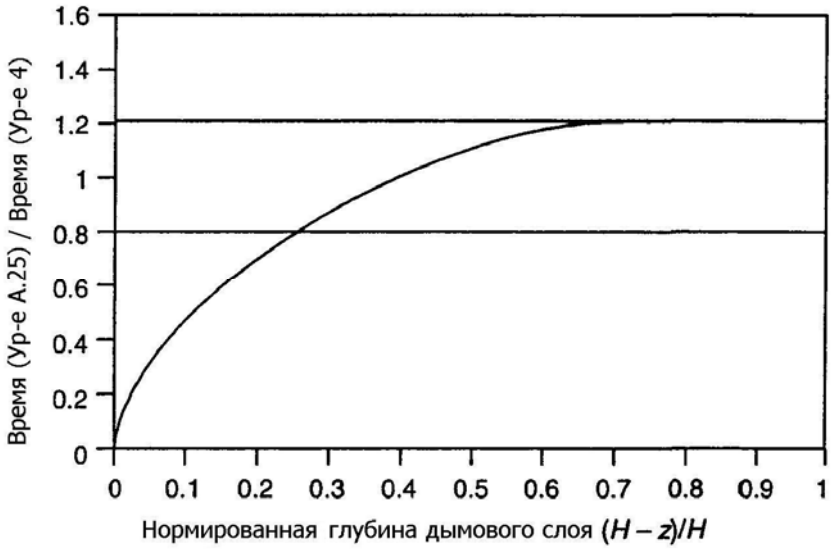


Рис. A.3.6.2.2(d) Сопоставление алгебраических уравнений (4) и (A.25): квадратичный пожар

Программы крупномасштабных испытаний в помещениях с высокими потолками

Прогнозирующие способности каждого уравнения могут быть исследованы путем сопоставления результатов вычислений с экспериментальными данными.

Прогнозирующая способность уравнения (A.23) была исследована путем сопоставления результатов вычислений с данными крупномасштабных испытаний. Источники экспериментальных данных, включающих показатели различной высоты потолков от 2,4 м до 12,5 м, а также размеры помещений и сценарии пожара, приведены в таблице A.3.6.2.2. В таблицу вошли источники данных, которые использовались при начальной разработке уравнения (3). Со времени проведения первоначальных расчетов появились данные двух дополнительных исследований. Данные двух дополнительных исследований представляют собой особый интерес, поскольку они были собраны при пожарах в гораздо более высоких помещениях, чем в первоначальных испытаниях.

Измеренные и прогнозируемые уровни дымового слоя предыдущих и двух новых наборов данных представлены как функции времени на рис. A.3.6.2.2(e). Данные, под заголовком «Данные комитета» включают все данные, на которые комитет опирался при первоначальной разработке уравнения (3). Отдельно представлены новые наборы данных. Как показано на рисунке, уровень дымового слоя из расчётных данных находится между уровнем, измеренным Канадским национальным советом по научным исследованиям (NRCC) и Научно-исследовательским строительным институтом (BRI). Таким образом, несмотря на различия в высоте помещений, новые и первоначальные наборы данных достаточно схожи. Кривая «NFPA 92B» демонстрирует прогнозы на основе уравнения (3). В целом, прогнозируемые данные обоих уравнений (3) и (A.23) и экспериментальных данных совпадают. Уравнение (3) задаёт нижнюю границу экспериментальных данных, включая новые данные Канадского национального совета по научным исследованиям (NRCC). Уравнение (A.23) прогнозирует среднее значение данных.

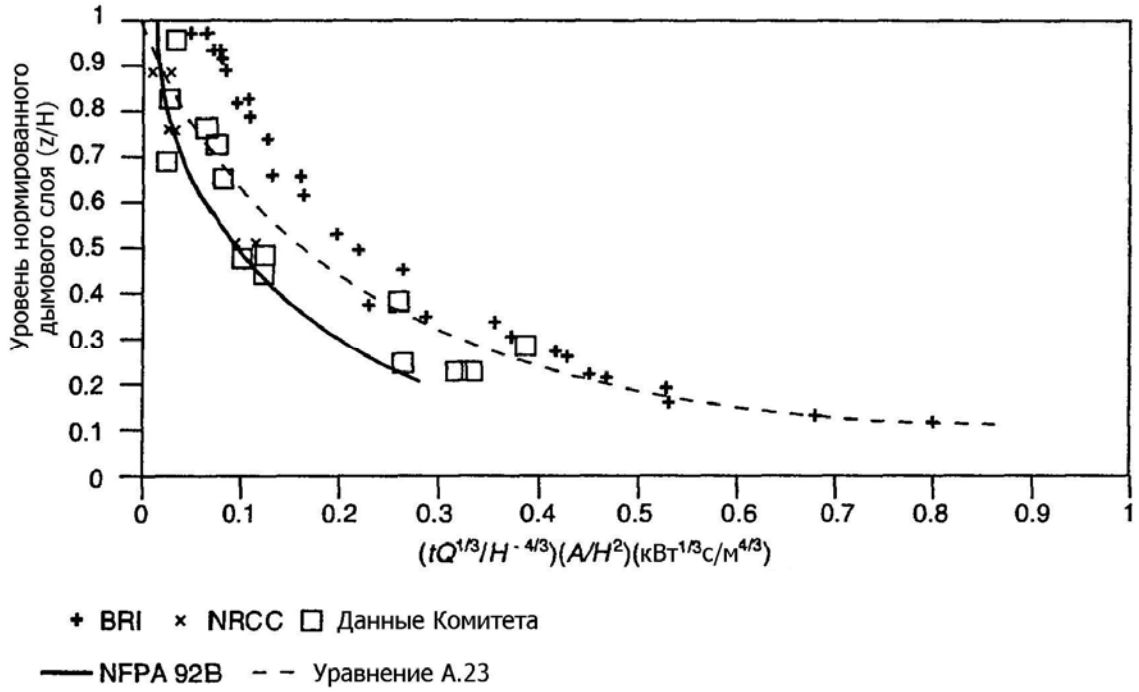


Рис. A.3.6.2.2(e) Сопоставление уровней дымового слоя: экспериментальные и прогнозируемые данные

Таблица A.3.6.2.2 Перечень полномасштабных испытаний

Исследовательская группа	**Топливо**	**Скорость выделения тепла**	**Размеры испытательного стенда**	**Измерения уровня дымового слоя**
Новые данные				
Научно-исследовательский строительный институт (BRI)	Резервуар метанола, 3,24 м^2	1,3 МВт (стационарный)	30 м x 24 м, высота: 26,3 м	Зрительные наблюдения, первое повышение температуры
Канадский национальный совет по научным исследованиям (NRCC)	Резервуар этанола, диаметр: 3,6 м	8 МВт (стационарный)	55 м x 33 м, высота: 12,5 м	Первое повышение температуры
Данные комитета				
Сандия, Испытание 7 [34]	Пропиленовая горелка, диаметр: 0,91 м	516 кВт	18,3 м x 12,2 м, высота: 6,1 м	Первое повышение температуры, концентрация диоксида углерода
Малхолланд [36]	Ацетиленовая горелка	16,2 кВт	3,7 м x 3,7 м, высота: 2,4 м	Повышение температуры, снижение видимости
Купер [37]	Метановая горелка	25 кВт, 100 кВт, 225 кВт	помещение с коридором и прихожей, площадь: 89,6 м^2, высота: 2,4 м	Повышение температуры
Хагглунд [35]	Резервуар с керосином, 0,5 м^2	280 кВт	5,62 м x 5,62 м, высота: 6,15 м	Зрительные наблюдения, первое повышение температуры

Уравнения, сопоставимые с уравнениями (3) и (A.23), могут быть заимствованы для различных площадей поперечного сечения и для пожаров, которые изменяются на основе степенной зависимости (например, квадратичных пожаров). Кроме того, существуют алгебраические уравнения, относящиеся к различным свойствам дымового слоя, включая температуру, снижение видимости и концентрацию продуктов горения. Эти уравнения могут применяться для оценки переходных условий перед запуском системы противодымной защиты или равновесных условий при работающей системе противодымной защиты. Таким образом, в распоряжении имеется множество алгебраических уравнений, которые могут служить в качестве полезных средств для относительно простых расчётов или для проверки отдельных элементов компьютерных расчётов в более сложных ситуациях.

Расчёт для помещений сложных геометрических форм

В отсутствии анализа с применением масштабных моделей, полевых моделей или видоизменённых зонных моделей следует использовать анализ чувствительности. Анализ чувствительности может предоставить важную информацию, которая будет способствовать инженерной оценке относительно применения уравнений (3) и (4) для помещений со сложными и неоднородными геометрическими характеристиками. Ниже приведен пример анализа чувствительности для большого помещения с потолком неплоской геометрической формы.

Первый этап анализа заключается в том, чтобы преобразовать неплоскую геометрическую форму потолка в форму, схожую или равнозначную по объему плоской геометрической форме.

В случае с геометрической формой, изображенной на рис. A.3.6.2.4(a), преобразование должно проводиться следующим образом:

(1) преобразовать непрямоугольную площадь вертикального поперечного сечения в прямоугольное вертикальное поперечное сечение равнозначной площади;

(2) размер высоты, соответствующий эквивалентному прямоугольному поперечному сечению, затем будет использован в качестве замещающего коэффициента высоты H_{sub} в уравнении (4).

Результаты уравнения (4) необходимо сопоставить с другими минимальными и максимальными условиями, как показано на рис. A.3.6.2.4(b).

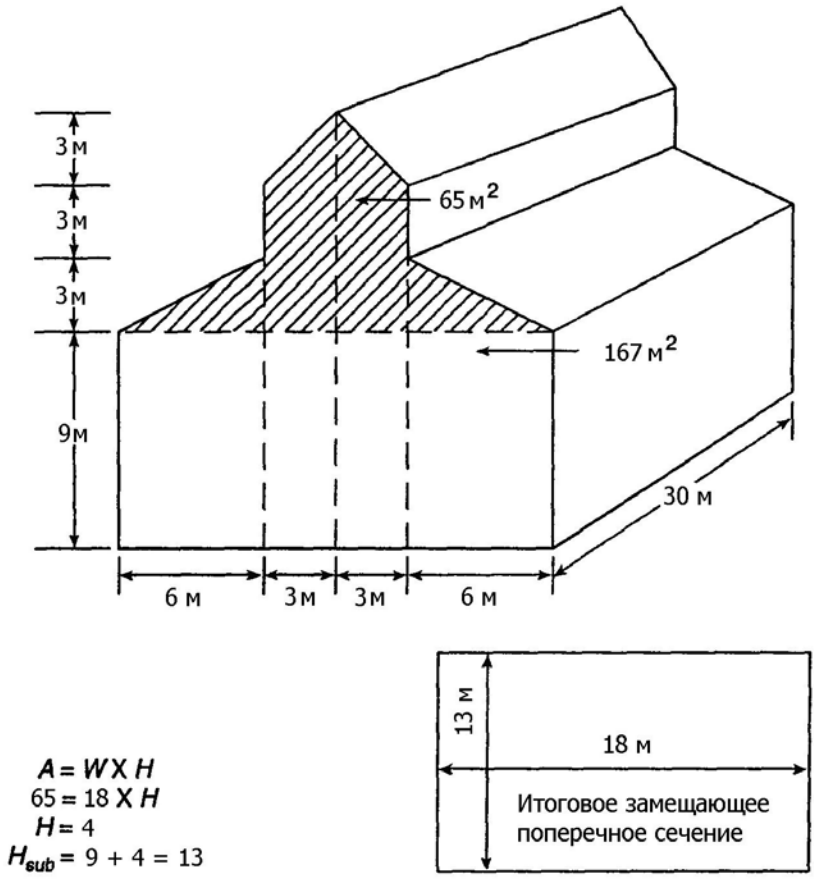


Рис. A.3.6.2.4(a) Помещение большой площади с потолком неплоской геометрической формы

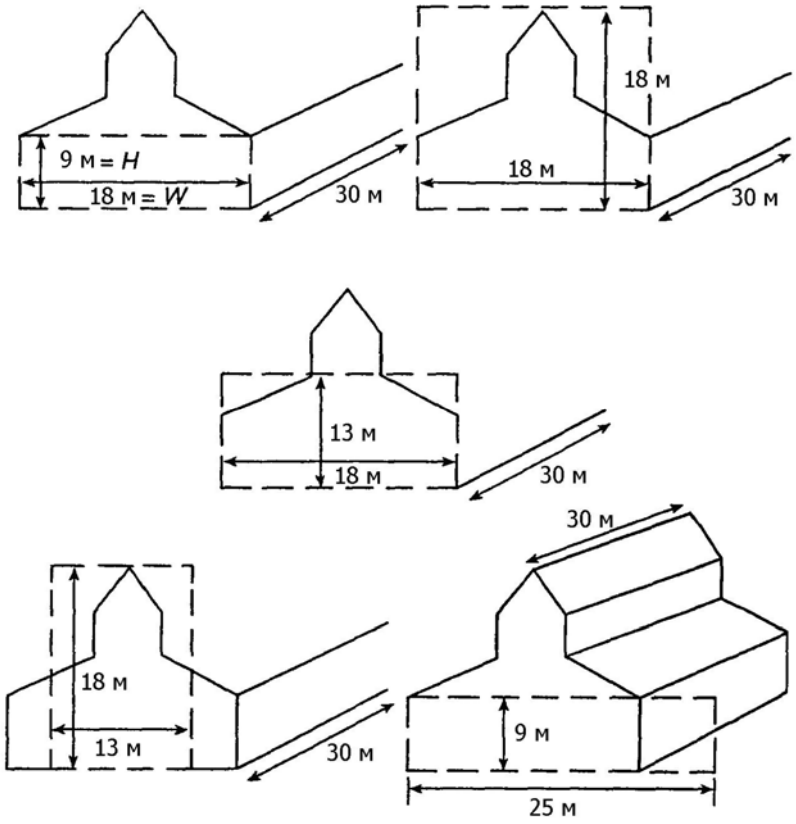


Рис. A.3.6.2.4(b) Другие параметры помещения неоднородной геометрической формы

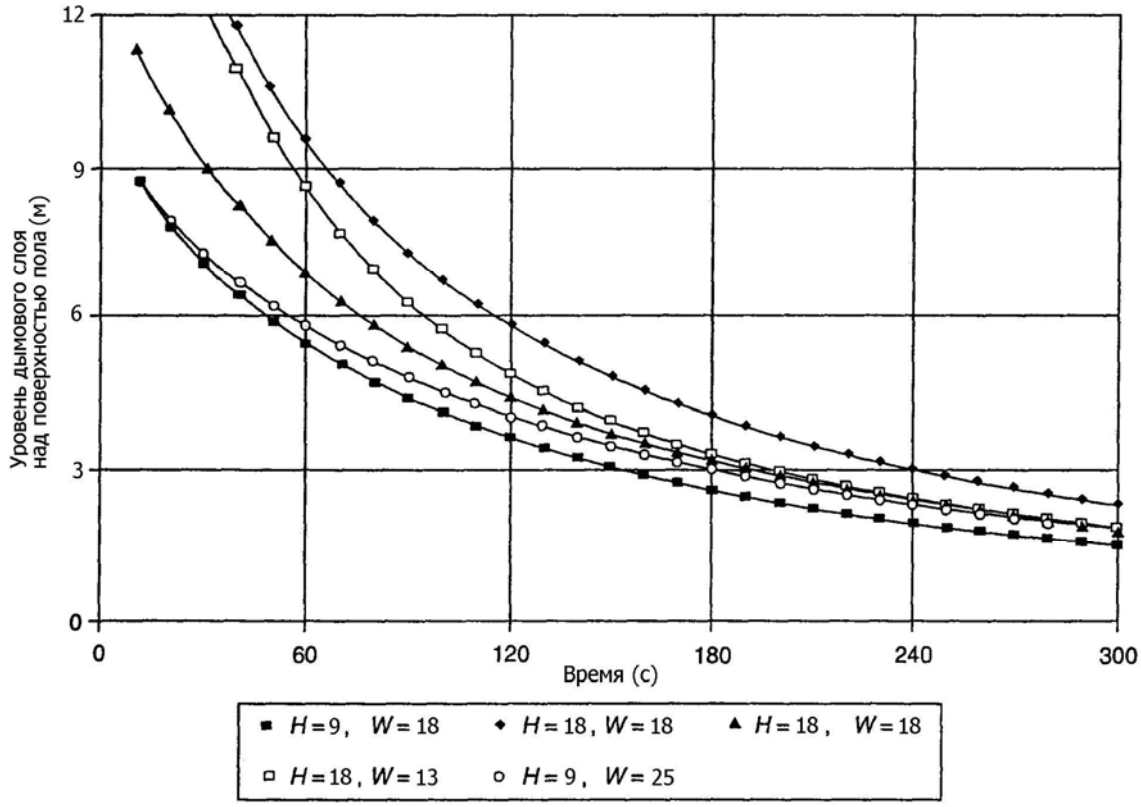


Рис. A.3.6.2.4(c) Сравнительные данные руководства по помещениям непрямоугольной геометрической формы – нарастающий пожар

Подходящим методом для сопоставления может служить график уравнения (4), приведенный на рис. A.3.6.2.4(c). Предположим, время эвакуации из данного здания составляет 3 минуты, и согласно критериям проектирования необходимо, чтобы дымовой слой оставался на высоте 3 метра над уровнем пола на протяжении всего времени эвакуации. Анализ кривых графика показывает, что значения высоты дымового слоя,

рассчитанные для замещающих значений, соответствуют расчёту. Этот вывод можно сделать на основании того факта, что ни параметры минимальной высоты (H =9 м, W =18 м), ни параметры максимальной высоты (H =18 м) не приводят к ожидаемому ответу, но соотнесенные данные обоих параметров (H =12 м, W =18 м; и H =9 м, W =25 м) позволяют выявить приблизительную оценку поведения дымового слоя в пространстве неоднородной формы. Таким образом, ожидание поведения, прогнозируемого максимальными или минимальными параметрами, не имеет смысла.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ПОЖАРЕ

В данном разделе представлены методы оценки скорости выделения тепла при горении различных наборов горючих материалов, характерных для зданий, в которых в качестве одного из средств пожарной безопасности могут использоваться системы дымоудаления. В первую очередь они касаются оценки концентрации горючих материалов в помещениях розничной торговли, стадионах, офисах и прочих помещениях большой площади. Методы оценки скорости выделения тепла, приведенные в данном разделе, основаны на условии «свободного горения», при котором исключается воздействие потолка или слоя горячего газа на пожар. Следовательно, предполагается, что скорость горения практически не зависит от горячего слоя.

Источники данных

Источники данных приведены в порядке очередности, при равном качестве методов сбора данных:

(1) натурные испытания с использованием исходных наборов горючих материалов;

(2) натурные испытания аналогичных наборов горючих материалов;

(3) алгоритмы, полученные при испытаниях наборов с аналогичными горючими материалами и размерными характеристиками;

(4) расчёты, основанные на испытанных свойствах, материалах и прогнозируемом огневом потоке;

(5) математические модели распространения и развития пожара.

Натурные испытания с использованием исходных наборов горючих материалов

Если натурные тепловые испытания определенного набора горючих материалов имеют результаты представленные в виде скорости выделения тепла, то эти результаты могут впоследствии быть использованы в качестве входных данных для методов, представленных в данном руководстве. Поскольку результаты натурных испытаний редко дают стационарный режим, свойственный пожарам с ограниченным ростом, или квадратичный рост, свойственный пожарам с непрерывным ростом (квадратичным пожарам), то, как правило, требуется инженерная оценка для получения точных входных данных, необходимых для применения одного из перечисленных подходов. В случае если применяется компьютерная модель, способная реагировать на скорость выделения тепла в соотношении с кривой времени, данные могут быть использованы напрямую. На сегодняшний день еще не существует установленного каталога испытаний определенных наборов горючих материалов. Однако, некоторые результаты испытаний содержатся в технических отчётах, а при необходимости могут быть поведены индивидуальные испытания.

Многие пожарные испытания не предусматривают расчёт скорости выделения тепла напрямую. В отдельных случаях она может быть рассчитана, исходя из измеренной скорости потери массы, при помощи следующей формулы:

$$Q = \dot{m} h_c \qquad \text{(B.1)}$$

где

Q – скорость выделения тепла, кВт

$\dot{m}$ – скорость потери массы, кг/с

h_c – теплота горения, кДж/кг

В других случаях скорость выделения тепла может быть получена, исходя из измерений высоты пламени:

$$Q = 37(\mathrm{L}+1{,}02D)^{5/2} \qquad \text{(B.2)}$$

где

Q – скорость выделения тепла, кВт

L – высота пламени, м

D – диаметр пожара, м

Натурные испытания аналогичных наборов горючих материалов

Если информации о натурном тепловом испытании конкретного набора горючих материалов найти не удалось, можно использовать данные одного или нескольких испытаний со схожими горючими материалами по наиболее важным показателям, таким как тип горючего материала, его расположение и сценарий воспламенения. Чем больше натурные испытания схожи с испытаниями исходного горючего материала, тем больше уверенность в том, что может быть использовано полученное значение скорости выделения тепла при горении аналогичного горючего материала. Однако, может потребоваться инженерная оценка, чтобы привести в соответствие данные исходных испытаний с данными, приближенными к испытаниям с исходным горючим материалом. Если скорость выделения тепла не была измерена напрямую, она может быть рассчитана методом вычисления скорости горения с помощью высоты пламени, который приведен в предыдущем подразделе.

Алгоритмы, полученные при испытаниях наборов с аналогичными горючими материалами и размерными характеристиками

Пожары пролива

Во многих случаях значение скорости выделения тепла при горении испытываемого набора горючих материалов делится на общую величину, такую как общая занятая площадь, чтобы рассчитать нормированную скорость выделения тепла на единицу площади. Наиболее полно сформулирован и общепринят алгоритм, касающийся скорости выделения тепла при пожарах пролива.

Скорость потери массы при пожаре пролива определяется при помощи следующего уравнения:

$$m'' = m''_0(1-e^{-kBD}) \qquad \text{(B.3)}$$

Переменные для уравнения (B.3) приведены в таблице B.5.1.

Таблица B.5.1 Расчётные данные оценки скорости горения в больших проливах

Материал	Плотность (кг/м^3)	h_c (кДж/кг)	m''_0 (кг/м^2·с)	kB (м$^{-1}$)
Криогенные виды топлива*				
Жидкий водород (H_2)	70	129100	0,0170	6,22
Сжиженный природный газ (преимущественно CH_4)	416	50000	0,078	1,08
Сжиженный нефтяной газ (преимущественно C_3H_8)	592	46500	0,097	1,40
Спирты				
Метанол (CH_3OH)	800	19770	0,0170	
Этанол (C_2H_5OH)	800	26750	0,0151	†
Простые органические виды топлива				†
Бутан (C_4H_{10})	576	46500	0,078	2,68
Бензин (C_5H_6)	848	39500	0,083	2,68
Гексан (C_6H_4)	656	44200	0,073	1,90
Гептан (C_7H_6)	672	44200	0,102	1,11
Ксилол (C_8H_{10})	864	40700	0,087	1,37
Ацетон (C_3H_6O)	784	25600	0,041	1,90
Диоксан ($C_4H_80_2$)	1040	25600	0,0180**	5,24**
Диэтиловый эфир ($C_4H_{10}O$)	720	33700	0,082	0,68
Нефтепродукты				
Бензин	736	44200	0,047	3,60
Газолин	736	44200	0,053	2,09
Керосин	816	43050	0,039	3,60
Реактивное топливо JP-4	752	43050	0,048	3,60
Реактивное топливо JP-5	816	43050	0,053	1,60
Трансформаторное масло, углеводород	752	46500	0,039**	0,68 **
Топливная нефть, тяжелая	944-992	39500	0,035	1,70
Неочищенная нефть	832-880	41900	0,0219 -0,044	2,78
Твердые вещества				
Полиметилметакрилат $(C_5H_80_2)_n$	1184	23260	0,019	3,27
Полипропилен $(C_3H_6)_n$	896	43050	0,018	
Полистирол $(C_8H_8)_n$	1056	39500	0,034	

* для проливов на сухой поверхности, не на воде

** установлено неточно, поскольку доступны только два значения

† - значение не зависит от диаметра в турбулентном режиме

Значения скорости высвобождения массы, полученные при помощи уравнения (B.3), следует преобразовать в скорость выделения тепла, используя уравнение (B.1) и значение теплоты сгорания из таблицы B.5.1. Скорость выделения тепла на единицу площади, помноженная на площадь пролива, даёт значение выделения тепла при предполагаемом пожаре.

Другие нормированные данные

При испытаниях были выявлены и другие данные, основанные на скорости горения на единицу площади. Наиболее доступные из них представлены в таблицах B.5.2.(a) и B.5.2.(b).

Таблица B.5.2.(a) Скорость выделения тепла на единицу площади при горении различных изделий

Изделие	кВт\м^2 общей площади
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, 0,45 м высотой (влажность 6-12%)	1418
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, 1,5 м высотой (влажность 6-12%)	3972
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, 3 м высотой (влажность 6-12%)	6810
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, 5 м высотой (влажность 6-12%)	10215
Наполненные почтовые сумки, сложенные одна на другую, 1,5 м высотой	397
Картонные коробки, сложенные одна на другую, 4,5 м высотой	1702
Наполненные полиэтиленовые лотки для писем, сложенные один на другой, высотой 1,5 м на тележке	8512
Полиэтиленовые мусорные баки в картонных коробках, сложенные один на другой, высотой 4,5 м	1986
Полиэтиленовые душевые кабинки из стеклопластика в картонных коробках, сложенные одна на другую, высотой 4,5 м	1418
Полиэтиленовые бутылки в картонных коробках с делениями	6242
Полиэтиленовые бутылки в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,5 м	1986
Полиуретановые теплоизоляционные плиты из жесткого пенопласта, сложенные одна на другую, высотой 4,5 м	1829
Полистироловые ёмкости, упакованные в картонные коробки с делениями	14187
Полистироловые банки в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,3 м	5391
Полистироловые детали игрушек в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,5 м	2043
Полистироловые теплоизоляционные плиты из жесткого пенопласта, сложенные одна на другую, высотой 4,3 м	3291
Бутылки из поливинилхлорида в картонных коробках с делениями	3405
Полипропиленовые банки, упакованные в картонные коробки с делениями	4426
Полипропиленовая и полиэтиленовая плёнка в рулонах, сложенных один на другой, высотой 4,3 м	6242
Метиловый спирт	738
Газолин	3291
Керосин	3291
Дизельное топливо	1986

Примечание: скорость выделения тепла на единицу площади полностью охваченного огнём горючего материала при незначительном обмене излучением со стороны окружающей среды и стопроцентной полноте сгорания. Также смотрите аналогичную таблицу (таблица 2) в подразделе «Расчётные пожары» раздела «Руководство к IBC 2003. Требования к противодымной защите».

Таблица B.5.2(b) Максимальные значения скорости выделения тепла

Складские материалы	Время роста пожара, с	Плотность выделения тепла *(q)*	Классификация скорости выделения тепла (м—медленная) (с—средняя) (б—быстрая)
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, высотой 0,45 м (влажность 6-12%)	150-310	1248	с-б
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, высотой 1,5 м (влажность 6-12%)	90-190	3745	б
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, высотой 3 м (влажность 6-12%)	80-110	6810	б
Деревянные поддоны, сложенные один на другой, высотой 5 м (влажность 6-12%)	75-105	10215	б
Наполненные почтовые сумки, сложенные одна на другую, высотой 1,5 м	190	397	б

Картонные коробки, сложенные одна на другую, высотой 4,5 м	60	2270	*
Бумажные рулоны, вертикально сложенные один на другой, высотой 6 м	15-28	—	*
Предметы одежды из хлопка (а также полиэстера, полиэстера/хлопка, акрила/нейлона/полиэстера) на стеллаже, высотой 3,6 м	20-42	—	*
Картонные коробки на поддонах, высотой 4,5-9 м	40-280	—	с-б
Бумаги, плотно запакованные в картонные коробки, на стеллаже, высотой 6,1 м	470	—	м-с
Наполненные полиэтиленовые лотки для писем, сложенные один на другой, высотой 1,5 м на тележке	190	8512	б
Полиэтиленовые мусорные баки в картонных коробках, сложенные один на другой, высотой 4,5 м	55	2837	*
Полиэтиленовые душевые кабинки из стеклопластика в картонных коробках, сложенные одна на другую, высотой 4,5 м	85	1248	*
Полиэтиленовые бутылки в картонных коробках с делениями	85	6242	*
Полиэтиленовые бутылки в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,5 м	75	1929	*
Полиэтиленовые поддоны, сложенные один на другой, высотой 1 м	130	—	б
Полиэтиленовые поддоны, сложенные один на другой, высотой 1,8 – 2,5 м	30-55	—	*
Одноместный матрас из полиуретана, расположенный горизонтально	110	—	б
Пенофенопластовые теплоизоляционные плиты из жёсткого пенопласта, сложенные одна на другую, высотой 4,5 м	8	1929	*
Полистироловые ёмкости, упакованные в картонные коробки с делениями	55	13620	*
Полистироловые банки в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,3 м	105	5107	б
Полистироловые детали игрушек в картонных коробках, сложенных одна на другую, высотой 4,5 м	110	2043	б
Полистироловые теплоизоляционные плиты из жёсткого пенопласта, сложенные одна на другую, высотой 4,3 м	7	3291	*
Бутылки из поливинилхлорида в картонных коробках с делениями	9	3405	*
Полипропиленовые банки, упакованные в картонные коробки с делениями	10	4426	*
Полипропиленовая и полиэтиленовая плёнка в рулонах, сложенных один на другой, высотой 4,3 м	40	4972	*
Очищенный спирт в бочках, составленных одна на другую, высотой 6,1 м	23-40	—	*
Метиловый спирт	—	738	—
Газолин	—	2270	—
Керосин	—	2270	—
Дизельное топливо	—	2043	—

Примечание:

1. $Qm = qA$, где Qm – максимальная скорость выделения тепла, кВт; q – плотность выделения тепла, кВт/м^2; A – общая площадь, м^2.

2. Значения скорости выделения тепла на единицу площади даны для полностью охваченного огнем горючего материала при стопроцентной полноте сгорания. Приведённые показатели времени роста пожара – это

показатели, требуемые для того, чтобы скорость выделения тепла превысила 1000 кВт для растущих пожаров при стопроцентной полноте сгорания.

*Скорость роста пожара выходит за пределы критериев классификации.

Другие важные данные

Другие ненормированные данные могут быть использованы при построении кривой скорости выделения тепла. Примеры приведены в таблицах B.5.3 (a) - B.5.3 (h).

Таблица 6.5.3(a) Максимальные значения скорости выделения тепла, полученные Институтом систем пожарной сигнализации

Единица горючего материала	Приблизительные значения, кВт
Мусорная корзина средней величины полная пакетов для молока	105
Большая бочка с пакетами для молока	150
Мягкий стул с наполнителем из полиутерановой пены	370
Матрас из латексной пены (нагревание со стороны двери помещения)	1270
Обставленная гостиная (нагревание со стороны открытой двери)	4200-8500

Таблица B.5.3(b) Свойства источников возгорания

Источник возгорания	Стандартный выход тепла (Вт)	Время горения[a] (с)	Максимальная высота пламени (мм)	Ширина пламени (мм)	Максимальный тепловой поток (кВт/м^2)
Сигарета массой 1.1 г (не прикуренная, лежащая на твердой поверхности), абсолютно сухая					
при предварительной обработке 50%	5	1200	-	-	42
при относительной влажности	5	1200	-	-	35
Таблетка метенамина, массой 0,15 г	45	90	-	-	4
Деревянная спичка (лежащая на твердой поверхности)	80	20-30	30	14	18-20
Деревянные поленицы					
Поленица № 4, 8,5 г	1000	190			15[d]
Поленица № 5, 17 г	1900	200			17[d]
Поленица № 6, 60 г	2600	190			20[d]
Поленица № 7, 126 г	6400	350			25[d]
Смятый коричневый пакет для обеда, 6 г	1200	80			
Мятая вощёная бумага, 4,5 г (плотно сжатая)	1800	25			
Мятая вощёная бумага, 4,5 г (расправленная)	5300	20			
Сложенный двойной газетный лист, 22 г (возгорание снизу)	4000	100			
Смятый двойной газетный лист, 22 г (возгорание сверху)	7400	40			
Смятый двойной газетный лист, 22 г (возгорание снизу)	17000	20			
Полиэтиленовая мусорная корзина, 285 г, наполненная 12-ю картонными пакетами для молока (390 г)	50000	200 [b]	550	200	35[c]

Пластиковые мусорные пакеты, наполненные целлюлозным мусором (1,2 – 1,4 кг)[e]	от 120000 до 350000	200 [b]			

[a] продолжительность существенного воспламенения;
[b] время полного сгорания превышает 1800 секунд;
[c] измерено на смоделированной горелке;
[d] измерено с расстояния 25 мм;
[e] результаты значительно различаются в зависимости от плотности упаковки.

Таблица B.5.3(c) Свойства типовых предметов мебели как источников возгорания

	Общая масса (кг)	**Общая теплоемкость (МДж)**	**Максимальная скорость выделения тепла (кВт)**	**Максимальное излучение тепла, направленное к центру этажа[a] (кВт/м^2)**
Мусорная корзина для бумаг	0,73-1,04	0,7-7,3	4-18	0,1
Шторы, бархат/хлопок	1,9	24	160-240	1,3-3,4
Шторы, акрил/хлопок	1,4	15-16	130-150	0,9-1,2
Телевизоры	27-33	145-150	120-290	0,3-2,6
Модель стула	1,36	21-22	63-66	0,4-0,5
Модель дивана	2,8	42	130	0,9
Кресло	26	18	160	1,2
Рождественские ёлки, сухие	6,5-7,4	11-41	500-650	3,4-14

[a] измерено приблизительно с расстояния 2 м от горящего предмета

Таблица B.5.3(d) Скорость выделения тепла в испытаниях со стульями и креслами Национального бюро стандартов (NBS)

Образец	**(кг)**	**Масса горючего материала (кг)**	**Тип**	**Каркас**	**Набивочный материал**	**Ткань**	**Промежуточный слой**	**Максимальное значение *m* (г/с)**	**Максимальное значение *q* (кВт)**
C12	17,9	17,0	Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок	нейлон	—	19,0	290[a]
F22	31,9		Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок (огнестойкий)	хлопок	—	25,0	370
F23	31,2		Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок (огнестойкий)	олефин	—	42,0	700
F27	29,0		Стандартное мягкое кресло	дерево	комбинированный	хлопок	—	58,0	920
F28	29,2		Стандартное мягкое кресло	дерево	комбинированный	хлопок	—	42,0	730
C02	13,1	12,2	Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок, полиуретан	олефин	—	13,2	800[b]
C03	13,6	12,7	Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок, полиуретан	хлопок	—	17,5	460[a]
CO1	12,6	11,7	Стандартное мягкое кресло	дерево	хлопок, полиуретан	хлопок	—	17,5	260[a]
C04	12,2	11,3	Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	нейлон	—	75,7	1350[b]
C16	19,1	18,2	Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	нейлон	неопрен	Нет данных	180
F25	27,8		Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	олефин	—	80,0	1990
T66	23,0		Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан, полиэстер	хлопок	—	27,7	640
F21	28,3		Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан (огнестойкий)	олефин	—	83,0	1970

F24	28,3		Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан (огнестойкий)	хлопок	—	46,0	700
C13	19,1	18,2	Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	нейлон	неопрен	15,0	230[a]
C14	21,8	20,9	Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	олефин	неопрен	13,7	220[a]
C15	21,8	20,9	Стандартное мягкое кресло	дерево	полиуретан	олефин	неопрен	13,1	210[b]
T49	15,7		Мягкое кресло	дерево	полиуретан	хлопок	—	14,3	210
F26	19,2		Более тонкое мягкое кресло	дерево	полиуретан (огнестойкий)	олефин	—	61,0	810
F33	39,2		Стандартный двухместный диван	дерево	комбинированный	хлопок	—	75,0	940
F31	40,0		Стандартный двухместный диван	дерево	полиуретан (огнестойкий)	олефин	—	130,0	2890
F32	51,5		Стандартный диван	дерево	полиуретан (огнестойкий)	олефин	—	145,0	3120
T57	54,6		Двухместный диван	дерево	полиуретан, хлопок	ПВХ	—	61,9	1100
T56	11,2		Офисный стул	дерево	латекс	ПВХ	—	3,1	80
C09/ T64	16,6	16,2	Стул из пенопласта	дерево (частично)	полиуретан, полиэстер	полиуретан	—	19,9	460
C07/ T48	11,4	11,2	Мягкое кресло (современный дизайн)	полистироловая пена	полиуретан	полиуретан	—	38,0	960
C10	12,1	8,6	Кресло на высокой ножке	жёсткий полиуретановый пенопласт	полиуретан	полиуретан	—	15,2	240[a]
C11	14,3	14,3	Стул из пенопласта	—	полиуретан	нейлон	—	Нет данных	810[b]
F29	14,0		Стандартное мягкое кресло	полипропиленовая пена	полиуретан	олефрин	—	72,0	1950
F30	25,2		Стандартное мягкое кресло	жёсткий полиуретановый пенопласт	полиуретан	олефрин	—	41,0	1060
CO8	16,3	15,4	Вращающийся стул на высокой ножке	прессованный полиэтилен	полиуретан	ПВХ	—	112,0	830[b]
CO5	7,3	7,3	Кресло-подушка	—	полистерин	ПВХ	—	22,2	370[a]
CO6	20,4	20,4	Кресло-подушка с пенопластовой спинкой	—	полиуретан	акрил	—	151,0	2480[b]
T50	16,5		Обыкновенный стул	металл	хлопок	ПВХ	—	Нет данных	<10
T53	15,5	1,9	Обыкновенный стул	металл	полиуретан	ПВХ	—	13,1	270
T54	27,3	5,8	Двухместный диван с металлическим каркасом	металл	полиуретан	ПВХ	—	19,9	370
T75/ F20	7,5 (X4)	2,6	Складные стулья (4 шт)	металл	полиуретан	ПВХ	—	7,2	160

[a] рассчитано при помощи показателей потери массы и предполагаемого Wh_c
[b] рассчитано по показателям концентрации газа у выхода

Таблица B.5.3(e) Зависимость скорости выделения тепла от типа ткани в таблице B.5.3(a) (внутри каждой группы все остальные элементы остаются постоянными)

Образец	Максимальное значение *q* (кВт) при полномасштабных испытаниях	Ткань	Набивочный материал
	Группа 1		
F24	700	хлопок (750 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
F21	1970	полиолефин (560 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
	Группа 2		
F22	370	хлопок (750 г/м^2)	ватная набивка
F23	700	полиолефин (560 г/м^2)	ватная набивка
	Группа 3		
28	760	отсутствует	огнестойкая полиуретановая пена
17	530	хлопок (650 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
21	900	хлопок (110 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
14	1020	полиолефин (650 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
7, 19	1340	полиолефин (360 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена

Таблица 8.5.3(f) Зависимость максимальной скорости выделения тепла от типа набивочного материала в таблице B.5.3(d) (внутри каждой группы все остальные элементы остаются постоянными)

Образец	Максимальное значение *q* (кВт) в полномасштабных испытаниях	Набивочный материал	Ткань
	Группа 1		
F21	1970	огнестойкая полиуретановая пена	полиолефин (560 г/м^2)
F23	1990	неогнестойкая полиуретановая пена	полиолефин (560 г/м^2)
	Группа 2		
F21	1970	огнестойкая полиуретановая пена	полиолефин (560 г/м^2)
F23	700	ватная набивка	полиолефин (560 г/м^2)
	Группа 3		
F24	700	огнестойкая полиуретановая пена	хлопок (750 г/м^2)
F22	370	ватная набивка	хлопок (750 г/м^2)
21	900	хлопок (110 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
14	1020	полиолефин (650 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
7, 19	1340	полиолефин (360 г/м^2)	огнестойкая полиуретановая пена
	Группа 4		
12, 27	1460	неогнестойкая полиуретановая пена	полиолефин (360 г/м^2)
7, 19	1340	огнестойкая полиуретановая пена	полиолефин (360 г/м^2)
15	120	неопреновая пена	полиолефин (360 г/м^2)
	Группа 5		
20	430	неогнестойкая полиуретановая пена	хлопок (650 г/м^2)
17	530	огнестойкая полиуретановая пена	хлопок (650 г/м^2)
22	0	неопреновая пена	хлопок (650 г/м^2)

Таблица B.5.3(g) Зависимость скорости выделения тепла образцов с неогнестойким полиуретановым набивочным материалом и полиолефриновой тканью от материала каркаса

Образец	Масса (кг)	Максимальное значение *q* (кВт)	Каркас
F25	27,8	1990	дерево
F30	25,2	1060	полиуретан

F29	14,0	1950	полипропилен

Таблица B.5.3(h) Параметры выбора скорости выделения тепла при расчёте

Пожары с постоянной скоростью выделения тепла	
Теобальд [17] (на территории промышленного предприятия)	260 кВт/м^2
Ло [49] (в офисном помещении)	290 кВт/м^2
Ханселл и Морган [50] (в комнатах отеля)	249 кВт/м^2
Пожары с различной скоростью выделения тепла	
Конфигурация горючего материала (NBSIR 88-3695)	**Скорость роста пожара**
Рабочее место, оснащенное компьютером	
Свободное горение	низкая - высокая
Помещение	очень низкая
Стеллажи	
Свободное горение	средняя до 200 с, высокая после 200 с
Офисный модуль	очень низкая – средняя
Единица горючего материала (NBSIR 483)	**Максимальная скорость выделения тепла (кВт)**
Рабочее место, оснащённое компьютером	1000-1300
Единица горючего материала (NBS, монография 173)	**Максимальная скорость выделения тепла (кВт)**
Стулья	80-2480 (<10, металлический каркас)
Двухместные диваны	940-2890 (370, металлический каркас)
Диван	3120

Описание рассчитанного пожара, основанное на испытанных свойствах

Общая оценка скорости выделения тепла горючих материалов производится на основе пожарных свойств этих материалов. Данные пожарные свойства могут быть определены при помощи мелкомасштабных испытаний. Наиболее значимыми мелкомасштабными испытаниями являются калориметрические испытания, включающие в себя калориметрию кислородного обеднения и применение внешнего теплового потока на образец, с целью определения времени возгорания, скорости высвобождения массы и скорости выделения тепла при определенном воздействующем потоке. Наиболее важными из современных испытательных приборов являются конический калориметр и калориметр, сертифицированный по стандартам FM (Factory Mutual). Основываясь на данных, полученных при помощи калориметров, также можно рассчитать температуру возгорания, критический поток возгорания, эффективную тепловую инерцию ($k\rho c$), теплоту сгорания, и теплоту газообразования. Свойства, необходимые для определения распространения пламени в направлениях, не совпадающих с потоком пламени, не поддающиеся измерению при помощи калориметров, могут быть измерены при помощи прибора для определения распространения пламени и боковых возгораний (LIFT). В данном разделе даётся понятие использования результатов испытаний пожарных свойств как основы для аналитического расчёта скорости выделения тепла, необходимого при использовании испытываемых материалов.

Анализ измеренных свойств

В таблице B.6.2. приведены виды пожарных свойств, которые могут быть получены при помощи конического калориметра или калориметра, сертифицированного по стандартам FM (Factory Mutual), или других подобных приборов.

Таблица B.6.2 Свойства, измеренные при помощи калориметра, в соотношении с расчётом пожаров

Свойство	**Возгорание**	**Распространение пламени**	**Размер пожара (энергия)**
Скорость выделения тепла*		×××	×××
Потеря массы*			×××
Время до возгорания*	×××	×××	
Расчётные термические свойства †	×××	×××	
Теплота сгорания †		×××	×××
Теплота газообразования †			×××
Поток критического возгорания †	×××	×××	
Температура возгорания †	×××	×××	

* свойство является функцией внешнего воздействующего падающего потока.
† свойства, полученные из калориметрических измерений.

Свойства скорости выделения тепла, потери массы и времени до возгорания, приведенные в таблице B.6.2, являются функциями внешнего падающего теплового потока, направленного на испытываемый образец. Задача внешнего потока заключается в том, чтобы смоделировать среду пожара, окружающую горящий объект. В целом, можно рассчитать, что на набор свободно горящих горючих материалов (то есть, набор материалов, которые горят в открытом пространстве, не подвергаясь воздействию обратного потока энергии от горячего газового слоя другого источника тепла, кроме своего собственного пламени), воздействует поток от 25 кВт/м^2 до 50 кВт/м^2. Если пожар протекает в помещении, и условия приводят к общей вспышке, поток может достигать от 50 кВт/м^2 до 75 кВт/м^2. В полностью развившемся пожаре на этапе после общей вспышки поток может варьироваться от 75 кВт/м^2 до 100 кВт/м^2 и выше. Далее каждое свойство рассмотрено индивидуально.

(a) *Скорость выделения тепла.* Скорость выделения тепла определяется при помощи калориметрии кислородного обеднения. Каждое испытание проводится при потоке, заданном пользователем, либо на протяжении заданного промежутка времени, либо до тех пор, пока образец не будет уничтожен огнем. Итоговые результаты предоставляются в виде графика зависимости скорости выделения тепла от времени, с обозначенным уровнем воздействующего потока. В некоторых случаях скорость выделения тепла в нескольких испытаниях с одним и тем же материалом при разном уровне воздействующего потока отображается в виде нескольких кривых для сравнения. Пример такого графика приведен на рис. B.6.2(a).

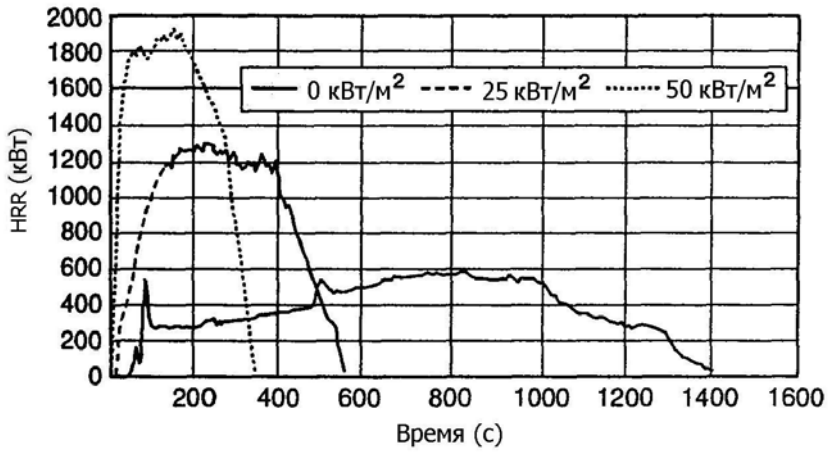


Рис. B.6.2(a) Типичный график выходных данных испытания в конусном калориметре

Часто в результатах отображается только максимальная скорость выделения тепла при заданном потоке. Пример см. в таблице B.6.2(a).

Таблица B.6.2(a) Средние показатели максимальной скорости выделения тепла (кВт/м^2)

Материал	Ориентация	Воздействующий поток: 25 кВт/м^2	Воздействующий поток: 50 кВт/м^2	Воздействующий поток: 75 кВт/м^2
Полиметилметакрилат	Горизонтальная	57	79	114
	Вертикальная	49	63	114
Сосна	Горизонтальная	12	21	23
	Вертикальная	11	15	56
Образец A	Горизонтальная	11	18	22
	Вертикальная	8	11	19
Образец B	Горизонтальная	12	15	21
	Вертикальная	5,3	18	29
Образец C	Горизонтальная		19	22
	Вертикальная		15	15
Образец D	Горизонтальная	6,2	13	13
	Вертикальная		11	11

(b) *Скорость потери массы (m).* Скорость потери массы определяется при помощи динамометрического датчика. Метод предоставления итоговых данных в точности такой же, как для скорости выделения тепла. В типичных условиях, когда материал обладает устойчивой теплотой сгорания, кривые скорости потери массы и скорости выделения тепла будут иметь схожую форму.

(c) *Время до возгорания (q_i).* Данные времени до возгорания предоставляются отдельно для каждого испытания и для уровня воздействующего потока, применяемого в испытании.

(d) *Эффективная тепловая инерция ($k\rho c$).* Эффективной тепловой инерцией называется показатель ответного увеличения тепла испытываемого материала под воздействием теплового потока, направленного на образец. Она рассчитывается в момент возгорания и основывается на соотношении падающего потока и потока критического возгорания и времени до возгорания. Для определения эффективной тепловой инерции необходимо провести серию испытаний при различных уровнях воздействующего потока. Эффективная тепловая инерция, рассчитанная таким способом, может отличаться от результатов, полученных при помощи данных руководства для значений (k, ρ и c) без проведения пожарных испытаний и может оказаться более предпочтительной.

(e) *Теплота сгорания (H_c).* Теплота сгорания рассчитывается путём деления измеренной скорости выделения тепла на измеренную скорость потери массы. Как правило, теплота сгорания предоставляется в виде отдельной величины, если образец не является композитным материалом и значения скорости выделения тепла и скорости потери массы не изменяются значительным образом в зависимости от времени и воздействия пожара.

(f) *Теплота газообразования (h_g).* Теплота газообразования представляет собой поток, необходимый для пиролиза единицы массы горючего вещества. Она рассчитывается как тепловой баланс и представляется как отдельная величина в единицах количества энергии на массу высвободившегося вещества (например, кДж/г).

(g) *Поток критического возгорания (q_{cr}).* Потоком критического возгорания называется минимальный уровень падающего потока, воздействующего на образец, необходимый для его возгорания, при неограниченном времени воздействия. Если уровни падающего потока имеют меньшее значение, чем уровень потока критического возгорания, то возгорания не происходит.

(h) *Температура возгорания (T_i).* Температурой возгорания называется температура поверхности образца, при которой происходит воспламенение. Данная величина характеризует материал образца и не зависит от свойств падающего потока. Она может быть получена при помощи калориметрических испытаний, испытаний с прибором для определения распространения пламени и боковых возгораний (LIFT) и других испытаний. Температура возгорания рассчитывается при помощи значения времени до возгорания в данном испытании, воздействующего потока и эффективной тепловой инерции данного образца. Она представляется в виде отдельной температурной величины. Если при испытании используется контрольная горелка или подготовительный искровой заряд, то температурная величина указывается для управляемого возгорания; если внешнее управление отсутствует, то указывается температурная величина для самовоспламенения.

Возгорание

Уравнения для расчёта времени до возгорания (t_{ig}) даны для термически тонких и термически толстых материалов, о которых сказано в подразделах ниже. Расчёт t_{ig} для материалов промежуточной толщины не входит в область применения данного документа.

(a) Термически тонкие материалы. При возгорании от устойчивого падающего теплового потока, t_{ig}, на нагреваемой поверхности и относительно малых потерях при теплопередаче на ненагреваемую поверхность термически тонким называется материал, температура которого остаётся относительно однородной по всей его толщине (l), при $t = t_{ig}$. Например, при $t = t_{ig}$:

$$T_{нагрев} - T_{ненагрев} = T_{ig} - T_{ненагрев} < 0{,}1(T_{ig} - T_0) \qquad \text{(B.4)}$$

Уравнение (B.4) может использоваться для выявления термически тонких материалов, при условии:

$$1 < 0{,}6(t_{ig}'')^{1/2} \qquad \text{(B.5)}$$

Например, для листового материала из клёна или дуба (с теплопроводностью $\alpha = 1{,}28 \times 10^{-7}$ м^2/с), при t_{ig} = 35 секунд, измеренном в испытании с управляемым возгоранием, согласно уравнению (B.5), если толщина образца составляет менее, чем 0,0013 м, то температура ненагреваемой поверхности будет приблизительно равна T_{ig} в момент возгорания, следовательно, образец будет считаться термически тонким материалом.

Время до возгорания термически тонкого материала, подвергаемого воздействию падающего потока, превышающему критический падающий поток, равно:

$$t_{ig} = \rho c l \frac{(T_{ig} - T_0)}{q_i''} \qquad \text{(B.6)}$$

(b) Термически толстые материалы. Относительно типа испытания на воспламенение, описанного в предыдущем подразделе, образец материала с толщиной (l) принимается за термически толстый материал, если увеличение температуры на ненагреваемой поверхности относительно мало по сравнению с температурой на нагреваемой поверхности при $t = t_{ig}$. Например, при $t = t_{ig}$:

$$T_{ненагрев}BT_0 < 0{,}1(T_{нагрев}BT_0) = 0{,}1(T_{ig}BT_0) \quad \text{(B.7)}$$

Уравнение (B.7) может использоваться для выявления термически толстых материалов при условии:

$$l > 2(t_{ig}10)^{1/2} \quad \text{(B.8)}$$

Например, в случае с испытанием на воспламеняемость листового материала из клёна или дуба, согласно уравнению (B.8), при t_{ig} = 35 секунд, измеренном в испытании с управляемым возгоранием, и толщине образца, превышающей 0,0042 м, температура ненагреваемой поверхности образца будет приблизительно равна T_0, и образец будет считаться термически толстым материалом.

Время до возгорания термически толстого материала, подвергаемого воздействую падающего потока, превышающего критический падающий поток, равно:

$$t_{ig} = \left(\frac{B}{4}\right)k\rho c\left(\frac{T_{ig}BT_0}{q_i''}\right)^2 \quad \text{(B.9)}$$

Необходимо заметить, что отдельный материал сам по себе не является термически тонким или термически толстым (характеристика материала как термически тонкого или толстого не является свойством самого материала), но эта характеристика зависит от толщины определенного образца (то есть, отдельный материал может обладать конфигурацией термически тонкого или термически толстого материала).

(3) *Распространение тепла между двумя наборами горючих материалов.* При исследовании распространения тепла между отдельными наборами горючих материалов, падающий поток может быть рассчитан с помощью стандартных методов лучистой теплопередачи.

Лучистая теплопередача от горящего набора горючих материалов с общей скоростью высвобождения энергии, равной Q, к внешней поверхности другого набора горючих материалов может быть рассчитана при помощи следующего уравнения:

$$q_{inc}'' = \frac{X_r Q}{4\pi r^2} \quad \text{(B.10)}$$

где:

q_{inc}" – падающий поток, направленный на горючее вещество

X_r – доля излучения воздействующего огня

Q – скорость выделения тепла воздействующего огня

r – радиальное расстояние от центра воздействующего огня до горючего вещества, подвергаемого воздействию

Расчёт скорости выделения тепла

Как было сказано выше, согласно испытаниям, высвобождение энергии при горении набора горючих материалов варьируется приблизительно от 25 кВт/м^2 до 50 кВт/м^2. Для предварительного анализа предлагается использовать данные испытаний со значением падающего потока, равным 50 кВт/м^2. Для первых приближенных значений необходимо допускать, что все поверхности, которые могут быть одновременно охвачены огнем, высвобождают энергию со скоростью равной скорости, установленной при испытании горючих свойств материала в калориметре с падающим потоком, равным 50 кВт/м^2 для свободно горящего материала и от 75 до 100 кВт/м^2 в условиях после общей вспышки.

При осуществлении этого расчёта необходимо допускать, что все поверхности, открытые для воздействующего огня (или перегретого газа, в условиях после общей вспышки), также горят, высвобождая энергию и массу с определенной скоростью. Если горение сопровождается достаточным количеством воздуха, расчёт скорости выделения тепла производится умножением площади воздействия пожара на скорость выделения тепла на единицу площади, рассчитанную в калориметрическом испытании. Если взяты данные испытаний падающего потока воздействующего огня, необходимо использовать значение скорости выделения тепла, полученные при испытаниях. Если взяты данные испытаний другого падающего потока, то скорость горения должна быть рассчитана, используя теплоту газообразования, как показано в уравнении (B.11), чтобы вычислить скорость горения массы на единицу площади:

$$m'' = \frac{q_i''}{h_c} \quad \text{(B.11)}$$

Полученная скорость потери массы умножается на расчётную теплоту сгорания и площадь горения, на которую воздействует падающий поток, чтобы получить расчётную скорость выделения тепла по следующей формуле:

$$Q_i'' = m'' h_c A \quad \text{(B.12)}$$

Распространение пламени

При необходимости прогнозировать рост пожара при его распространении по горючим поверхностям, необходимо рассчитать распространение пламени. На сегодняшний день вычисление скорости распространения пламени является развивающейся технологией, всё еще находящейся на этапе зарождения. Прогнозируемые данные должны рассматриваться в качестве оценок порядка величины.

Распространение пламени представляет собой продвижение огня по поверхности горящего материала (или воспламенившегося материала), при котором горящая поверхность еще не полностью охвачена огнем. С точки зрения физики, распространение пламени представляет собой последовательность возгораний, возникающую в результате тепловой энергии, выделяемой горящей частью материала, её пламенем и любыми другими случайными источниками тепловой энергии, воздействующими на несгоревшую поверхность. В число других источников случайной энергии могут входить другие горящие предметы, высокотемпературные газы, способные скапливаться в верхнем слое закрытого помещения, и излучающие источники тепла, используемые в испытательных приборах, таких как конический калориметр или аппарат по определению распространения пламени и боковых возгораний (LIFT). Для аналитических целей распространение пламени может делиться на две категории: распространение пламени в одном направлении с факелом пламени (сопутствующее или совпадающее с направлением ветра) и распространение пламени, движущееся в любом другом направлении (боковое или противоположно направленное). Сопутствующее распространение пламени сопровождается падающим тепловым потоком в направлении поверхностей горящего материала, неохваченных огнем. Боковое распространение пламени не имеет такой поддержки и, как правило, прогрессирует гораздо медленнее, если не предусмотрен внешний источник теплового потока. Сопутствующее распространение пламени может быть выражено следующей формулой:

$$V = \frac{q_i'' L}{k\rho c (T_{ig} - T_s)^2} \qquad \text{(B.13)}$$

Значения $k\rho c$ и температуры возгорания рассчитываются с помощью конического калориметра, как было описано ранее. Для данного уравнения длина пламени (L) измеряется на переднем крае участка горения.

КВАДРАТИЧНЫЕ ПОЖАРЫ

В течение последнего десятилетия исследователи, заинтересованные в разработке обобщенной характеристики скорости выделения тепла случайных свободно горящих пожаров, использовали для этой цели «квадратичную» аппроксимацию. Квадратичным пожаром называется такой пожар, при котором скорость горения изменяется пропорционально квадрату времени. Квадратичные пожары часто классифицируются по скорости роста пожара: быстрые, средние и медленные (и иногда сверхбыстрые). Данная классификация основывается на времени, затрачиваемом на рост пожара до момента, при котором скорость выделения тепла достигнет 1000 кВт. Ниже представлены показатели времени для каждого класса пожара:

Классы	Время до достижения 1000 кВт
Сверхбыстрый	75 с
Быстрый	150 с
Средний	300 с
Медленный	600 с

Общая формула:

$$q = at^2$$

где
q – скорость выделения тепла, кВт
a – постоянный коэффициент скорости роста
t – время, с

Соответствие аппроксимации квадратичного пожара и реального пожара

Квадратичный пожар может рассматриваться как пожар, в котором скорость выделения тепла на единицу площади постоянна по всей горящей поверхности и при котором огонь распространяется по окружности с постоянно увеличивающимся радиусом. В таких случаях, площадь горения увеличивается пропорционально квадрату радиуса пожара. Разумеется, другие виды пожаров, которые не располагают настолько удобными упорядоченными наборами горючих материалов и устойчивой скоростью горения, также могут строиться по кривой квадрата времени или не строиться по ней. Подразумевается предположение, что квадратичная аппроксимация является достаточно точной для рациональных расчётных решений.

На рис. С.2(а) показано, что большинство пожаров проходят через инкубационный период, в течение которого пожар не соответствует квадратичной аппроксимации. В отдельных случаях инкубационный период может нанести серьёзный вред использованию квадратичной аппроксимации. В большинстве случаев это не составляет серьёзной проблемы для атриумов и других больших помещений. Предполагается, что скорости выделения тепла в течение инкубационного периода, как правило, бывает недостаточно для активации системы обнаружения дыма. В любом случае, если активация системы обнаружения дыма наступает, или наблю-

дение человеком приводит к более ранней активации системы дымоудаления, то необходимые меры безопасности будут приняты.

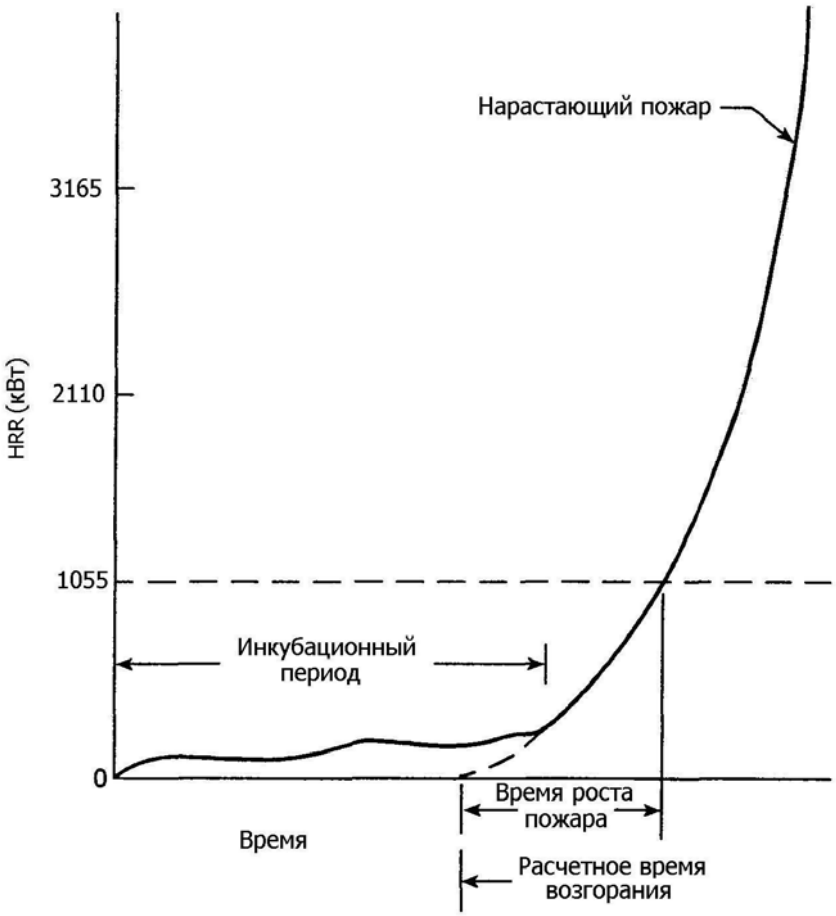


Рис. C.2(a) Схематическое изображение продолжительного роста пожара

На рис. C.2(b) сопоставлены кривые скорости выделения тепла, характеризующие вышеупомянутые классы квадратичных пожаров, и два испытательных пожара, как правило, использующихся для испытательных целей. Испытательные пожары показаны пунктирными линиями и обозначены как «мебель» и «склад высотой 1,8 м». Пунктирными линиями, отдаленными от точки начала координат, обозначена фактическая скорость выделения тепла испытательных пожаров, применявшихся при разработке спринклеров для жилых помещений, и стандартного типа испытания с набором горючих материалов из картонных коробок с пенопластовыми ведрами 1,8 м в высоту, также часто используемого в стандартных испытательных пожарах.

Несколько других пунктирных линий на рис. C.2(b) представляют собой те же самые кривые, перемещенные в начало координат для сравнения. Очевидно, что скорость роста данных пожаров фактически больше, чем скорость роста установленная для сверхбыстрого пожара. Это уместно для пожара, предназначенного для испытания системы пожаротушения.

На рис. C.2(c) соотносятся классы кривых роста квадратичных пожаров с некоторыми наборами натурных горючих материалов. Отдельные наборы горючих материалов описаны в подразделе «Прогнозирование скорости выделения тепла при пожаре» раздела «Справочная информация».

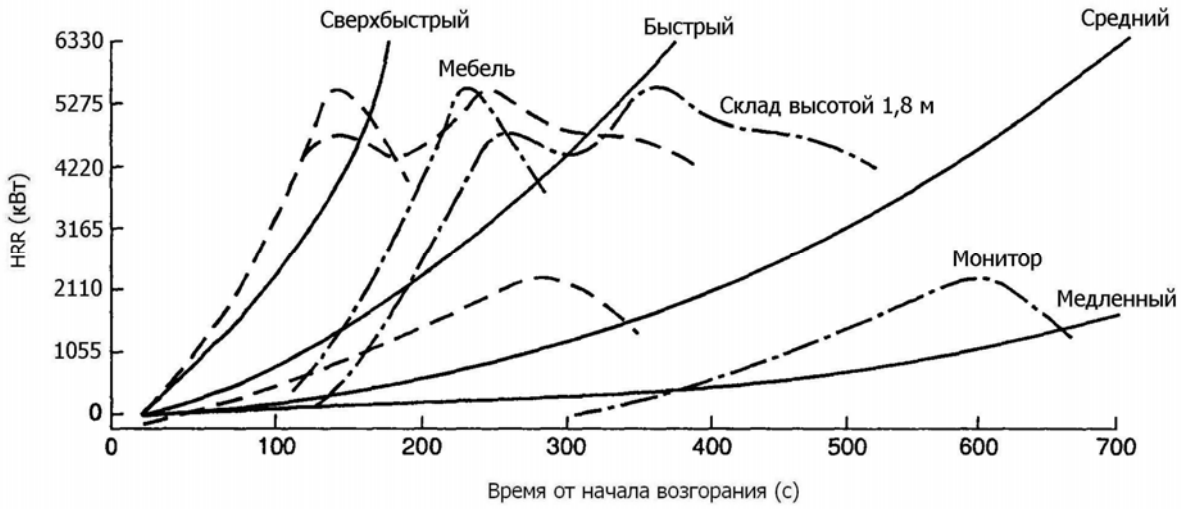


Рис. С.2(b) Квадратичный пожар, скорости выделения энергии

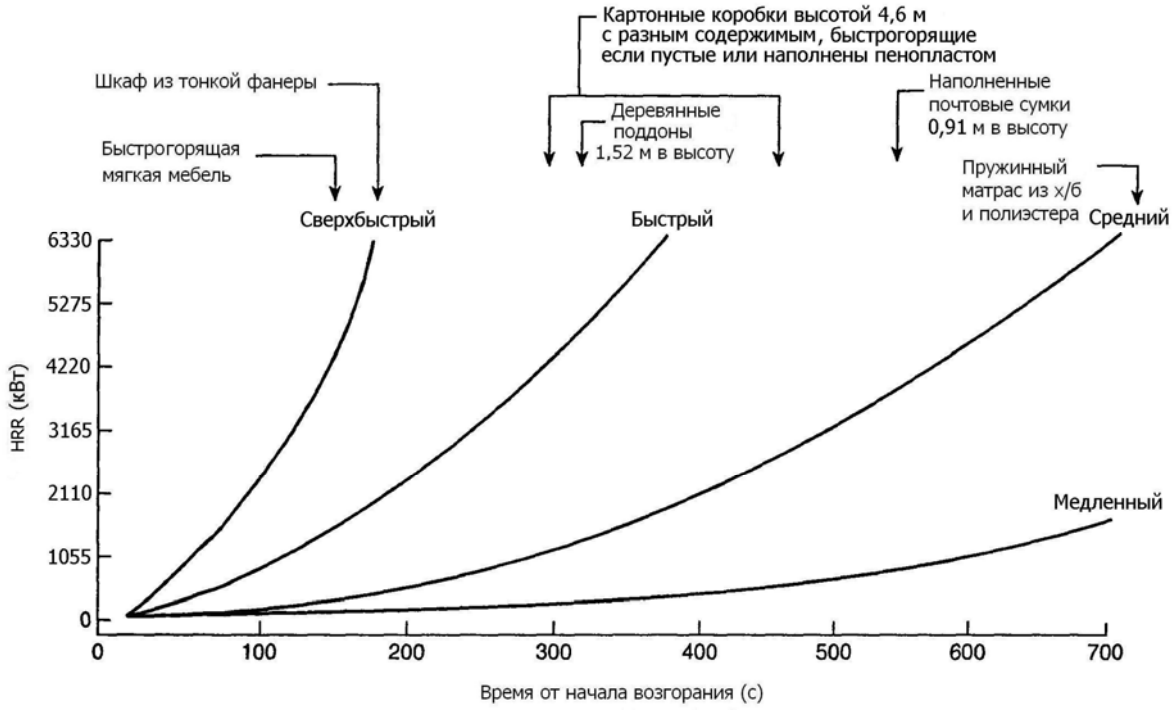


Рис С.2(c) Связь между квадратичными пожарами и некоторыми пожарными испытаниями

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИ ПОМОЩИ УРАВНЕНИЙ, ПРИВЕДЁННЫХ В СТАНДАРТЕ NFPA 92B

Условия задачи

Дано: Атриум с однородной прямоугольной площадью поперечного сечения.

Высота 36,6 м
Площадь 1 858 м²
A/H^2 1,4
Расчётный пожар (стационарный) 5275 кВт
Наиболее высоко расположенная поверхность перемещения людей 28 м

Задача 1. Определить время, когда первые признаки дыма окажутся на высоте 1,83 м над наиболее высоко расположенной поверхностью перемещения людей.

Решение:

(a) Используя уравнение (3):

$$\frac{z}{H} = 1{,}11 - 0{,}28\ln\left(\frac{tQ^{1/3}/H^{4/3}}{A/H^2}\right)$$

z 30,5 м
H 36,6 м
Q 5275 кВт

$Q^{1/3}$ 17,4
$H^{4/3}$ 121,4
A/H^2 1.4

$$0{,}83 = 1{,}11 - 0{,}28 \ln\left(\frac{17{,}4t/121{,}4}{1.4}\right)$$

$$0{,}83 = 1{,}11\ 0{,}28\ln\left[\frac{0{,}14t}{1{,}4}\right]$$

$0{,}83 = 1{,}11 - 0{,}28 \ln [0{,}1t]$

$1 = \ln [0{,}1t]$

$2{,}8 = 0{,}1t$

$t = 28$

t = 28 секунд

(b) Используя метод массового расхода струи, основанный на уравнении (8):

Могут быть использованы два метода расчёта. Первый расчёт предполагает, что значение плотности дымового слоя равно 1,2 кг/м^3, что эквивалентно значению дымового слоя при температуре 21°C. Второй расчёт предполагает, что температура дымового слоя равна средней температуре потока на уровне границы дымового слоя. В обоих случаях тепловые потери дымового слоя у границ атриума не учитываются. Для обоих расчётов выбран временной интервал, равный 1 секунде.

Расчёт 1 – Без коррекции плотности дыма.

Шаг 1. Рассчитать массовый расход струи (кг/с) при z=*H*, используя уравнение (8).

Шаг 2. Преобразовать массовый расход в объёмный расход, при температуре дыма, равной 21°C, используя формулу:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

где
V – объёмный расход, м^3/с
m – массовый расход, кг/с
ρ – плотность дыма, кг/м^3

Шаг 3. Допуская, что объём дыма, образующийся в течение установленного временного интервала, мгновенно и равномерно распространяется по площади атриума, определить толщину дымового слоя *dz* (м), образовавшегося в течение установленного промежутка времени.

Шаг 4. Рассчитать высоту границы дымового слоя (в метрах).

Повторять шаги (1)–(4) до тех пор, пока граница дымового слоя не достигнет расчётной высоты.

Образцы значений приведены в таблице E.1, где показаны методы расчёта.

Задача 2. Определить объёмный расход, требуемый, чтобы удерживать уровень дыма на высоте 1,5 м от наиболее высоко расположенного уровня поверхности перемещения людей в атриуме, в данном случае, балкон 9-го этажа. Рассмотреть случай протекания пожара в центре этажа атриума.

При протекании пожара в центре атриума предполагается наличие осесимметричной струи. Во-первых, для определения высоты пламени нужно использовать уравнение (7).

Дано:
Q_c = 3692 кВт
$z_l = 0{,}166\ Q_c^{2/5}$
$z_l = 0{,}166\ (3692)^{2/5}$
z_l = 4,2 м

При высоте расчётной границы дымового слоя, равной 26 м над уровнем этажа, высота пламени составляет меньше, чем высота расчётного дымового слоя. Следовательно, применяя уравнение (8) для определения скорости дымообразования на уровне высоты границы дымового слоя, получаем:

z = 26 м
$m = 0{,}071 Q_c^{1/3}\ z^{5/3} + 0{,}0018 Q_c$
$m = 0{,}071(3692)^{1/3}(26)^{5/3} + 0{,}0018\ (3692)$

m = 242,6 кг/с

При условии, что скорость дымоудаления равна скорости дымообразования, глубина дымового слоя будет стабилизирована на расчётной высоте. Таким образом, преобразование скорости массового расхода в скорость объёмного расхода производится по уравнению:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

где
ρ = 1,2 кг/м^3
V = 242,6 /1,2
V = 202,2 м^3/с или 12132 м^3/мин

Таблица Е.1 Примеры расчётных значений

Время (с)	z (м)	Массовый расход (кг/с)	Объёмный расход (м^3/с)
1	36,4	445,5	369,6
2	36,2	441,5	366,2
3	36	437,4	363
4	35,8	433,8	359,7
5	35,6	429,8	356,5
6	35,4	425,7	353,3
7	35,2	422,1	350,2
8	35	418,5	347,1
9	34,8	415	344
10	34,6	411,3	341,1
11	34,4	407,7	338,1
12	34,2	404,1	335,1
13	34	400,5	332,2
14	33,9	397	329,4
15	33,7	393,8	326,5
16	33,5	390,2	323,7
17	33,4	387	321
18	33,2	383,4	318,2
19	33	380,3	315,6
20	32,9	377,1	312,8
21	32,7	374	310,2
22	32,5	370,8	307,6
23	32,4	367,7	305
24	32,2	364,5	302,5
25	32	361,8	300
26	31,8	358,6	297,5
27	31,7	355,5	295,1
28	31,5	352,8	292,6
29	31,4	349,7	290,2
30	31,2	347	288
31	31	344,3	285,5
32	30,9	341,5	283,2
33	30,8	338,4	281
34	30,6	335,7	278,7
35	30,5	333	276,4

Задача 3. Определить, будет ли поток соприкасаться со всеми стенами, прежде чем он достигнет расчётной высоты, заданной в задаче 2 (1,5 м над наиболее высоко расположенным уровнем зоны перемещения людей).

Расчёт в задаче 2 предполагает, что дымовой поток не расширялся, чтобы соприкасаться со стенами атриума, прежде чем он достиг высоты расчётной границы. Этот расчёт служит в качестве проверки.

Используя уравнение (10) с высотой границы, равной 26 м (z= 26 м)
d = 0,5 z
d = 0,5 (26)
d = 13 м

Следовательно, дым не соприкасается со стенами атриума, прежде чем он достигнет высоты расчётной границы.

Задача 4. На 10-м этаже требуется создать проём 3 м в ширину х 1,8 м в высоту из помещения арендатора в атриум.

(a) Для пожара на площади арендатора определить встречный воздушный поток, требуемый, чтобы удерживать дым в пределах пространства арендатора (предполагаемая температура пожара равна 811°K)
Используя уравнение (11):
Дано:
H = 1,83 м
g = 9,8 м/с^2
T_f = 811°K
T_0 = 294°K
$v = 0{,}64\ [gH\ (T_f - T_0) / (T_f)]^{1/2}$
$v = 0{,}64\ [(9{,}8)\ (1{,}83)\ (811\text{-}294) / (811)]^{1/2}$
v = 2,16 м/с

(b) Для пожара в атриуме определить встречный воздушный поток, требуемый для ограничения проникновения дыма в помещение арендатора.
Дано:
Q = 5275 кВт
z = 27,4 м

$v_e = 0{,}057\ [Q/z]^{1/3}$
$v_e = 0{,}057\ [5275/27{,}4]^{1/3}$
ve= 0,33 м/с

NFPA 5000. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЕ АТРИУМОВ И СМЕЖНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Информация по атриумам и смежным помещениям приведена в данной главе на основе стандарта NFPA 5000 «Строительные нормы и правила безопасности при строительстве» [2].

АТРИУМЫ

Использование атриумов допускается при соблюдении следующих условий:

- атриум должен быть отделен от прилегающих помещений противопожарными преградами с минимальным пределом огнестойкости, равным 1 часу, с открывающимися преградами для стен коридоров за исключением следующих случаев:
  a) допускается любое количество уровней здания с выходом к атриуму без ограждения.
  b) допускается использование застекленных стен и глухих (неоткрывающихся) окон вместо противопожарных преград при соблюдении всех следующих условий:
     - вдоль обеих сторон застекленной стены и глухих окон должны быть установлены автоматические спринклеры с интервалом не менее 1828 мм.
     - автоматические спринклеры должны быть установлены на расстоянии не более чем 0,3 м от поверхности стекла и расположены таким образом, чтобы площадь стекла полностью орошалась водой при работе спринклеров.
     - застекленные стены и глухие окна должны состоять из закалённого, армированного или многослойного стекла, закрепленного уплотнительной системой, позволяющей остекленной рамной системе прогибаться, не вызывая разрушения посредством нагрузки на стекло прежде чем сработают спринклеры.
     - допускается отсутствие автоматических спринклеров на застекленной стене и глухих окнах со стороны атриума, в случае, если со стороны атриума отсутствует зона перемещения людей или другая этажная площадь над уровнем главного этажа.
     - двери в проемах застекленных стен должны состоять из стекла или другого материала, препятствующего проникновению дыма.
     - двери должны быть самозакрывающимися или автоматически закрывающимися при обнаружении дыма.
- в зоне атриума допускается расположение доступа к выходам и выходов наружу.
- оборудование, находящееся в помещении, должно соответствовать спецификациям классов малопожароопасных или умереннопожароопасных материалов.
- здание должно быть полностью защищено сертифицированной автоматической спринклерной системой.
- в помещении должен быть проведен технический анализ, подтверждающий, что конфигурация здания позволяет удерживать границу дымового слоя выше уровня наиболее высокорасположенного открытого проема к прилегающим помещениям, или на расстоянии 1828 мм над уровнем наиболее высокорасположенного этажа с выходом к атриуму либо в течение промежутка времени, в 1,5 раза превышающего расчетное время эвакуации, либо в течение 20 мин, в зависимости от того, какое значение больше.
- в помещении должна быть установлена система дымоудаления, независимо активируемая любым из следующих способов:
  a) при срабатывании определенной автоматической спринклерной системы в зоне атриума или помещениях, прилегающих к атриуму
  b) при помощи ручного управления, доступного пожарному подразделению.

СМЕЖНЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Использование открытых проемов в перекрытиях, образующих смежные помещения между этажами, допускается при соблюдении следующих условий:

- смежные помещения должны объединять не более трех соседних этажей.
- нижний или соседний с нижним этаж, находящийся в пределах смежных помещений, принимается за этаж, расположенный на уровне улицы.
- общая площадь смежных помещений на этаже должна быть открыта и лишена заграждений, таким образом, чтобы в случае возникновения пожара в любой части смежных помещений пользователи были незамедлительно оповещены о пожаре, до наступления угрозы их жизни и здоровью.
- смежные помещения должны быть отделены от остальной части здания противопожарными преградами с пределом огнестойкости не менее чем 1 час, за исключением следующих случаев:
  a) в зданиях, оснащенных сертифицированной автоматической спринклерной системой по всей площади, вместо противопожарных преград допускается использование дымозащитных преград.
  b) в жилых корпусах следственных тюрем и исправительных учреждений, полностью оснащенных спринклерными системами, данное требование не действует.
- в смежных помещениях должны содержаться умереннопожароопасные материалы, полностью защищенные сертифицированной автоматической спринклерной системой, или только малопожароопасные материалы.

- пропускная способность выходов должна обеспечивать одновременную эвакуацию всех людей, находящихся на всех этажах смежных помещений, принимаемых за единую этажную площадь.
- каждый пользователь, находящийся в смежном помещении, должен иметь доступ к одному или нескольким выходам без необходимости проходить через другой этаж смежного помещения.
- каждый пользователь, находящийся за пределами смежного помещения, должен иметь доступ к одному или нескольким выходам без необходимости входить в смежное помещение.

IBC 2003. ПРОТИВОДЫМНАЯ ЗАЩИТА АТРИУМОВ И ЗДАНИЙ КРЫТЫХ МОЛЛОВ

Информация по зданиям крытых моллов, атриумам, а также системам противодымной защиты приведена в данной главе на основе IBC 2003 «Международные строительные нормы» 2003 года [1]. В данном документе встречаются следующие понятия:

Группа B – здания, сооружения или их часть, предназначенные для офисной, профессиональной деятельности или операций по предоставлению услуг и включающие хранение учетных документов и отчетности. В данную группу входят: командные диспетчерские пункты аэропортов, ветеринарные лечебницы, питомники и приюты для животных; банки; салоны красоты и парикмахерские; автомобильные мойки; здания общественного управления; поликлиники – для амбулаторного лечения; химчистки и прачечные; пункты приема, доставки и самообслуживания; образовательные учреждения выше 12 класса; электронная обработка данных; центры электронной обработки данных; лаборатории для испытаний и исследований; автосалоны; почтовые отделения; типографии; организации, оказывающие профессиональные услуги (проектные, инженерные, терапевтические, услуги адвоката, стоматолога); радио- и телевизионные станции; телефонные станции.

Группа H – здания, сооружения или их часть, предназначенные для производства, обработки или хранения материалов, представляющих физическую опасность или угрозу здоровью.

Группа I – здания, сооружения или их часть, предназначенные для ухода за людьми, или содержания людей под наблюдением из-за ограничений физического характера, вызванных заболеваниями или по возрастным причинам, направленных на медицинское лечение или другого рода уход, или учреждения, предназначенные для содержания задержанных в карательных или исправительных целях, или в которых ограничена свобода, людей, находящихся в этих учреждениях. Группа I включает в себя следующие подгруппы:

Подгруппа I-2 – здания, сооружения или их часть, предназначенные для предоставления круглосуточной медицинской, хирургической, психиатрической помощи или повседневного ухода за более чем пятью пациентами, не способными к самостоятельному поддержанию жизни. В данную подгруппу входят: больницы, дома престарелых, психиатрические больницы, наркологические центры.

Подгруппа I-3 – здания или сооружения, населенные более чем пятью людьми, находящимися в условиях изоляции или лишения свободы. В данную подгруппу входят: тюрьмы, исправительные заведения для несовершеннолетних преступников, места предварительного заключения, исправительные колонии, центры предварительного освобождения.

Группа R – здания, сооружения или их часть, предназначенные для проживания, в отличие от учреждений. Группа R включает следующие подгруппы:

Подгруппа R-1: Жилые здания, предназначенные для кратковременного проживания, включая: пансионаты (для временного пребывания), отели (для временного пребывания), автодорожные гостиницы (для временного пребывания).

Подгруппа R-2: Жилые здания, содержащие спальные места или более двух единиц жилья, преимущественно предназначенные для постоянного проживания, включая: квартирные дома; пансионаты (для долговременного проживания); женские монастыри; общежития; мужские и женские общины; мужские монастыри; апартаменты на условиях таймшер; отели (для долговременного проживания); автодорожные гостиницы (для долговременного проживания).

ЗДАНИЯ КРЫТЫХ МОЛЛОВ

Требования данного раздела относятся к зданиям или сооружениям, определенным здесь как здания крытых моллов, не превышающие уровня трех этажей в любой точке или не выше трех этажей над уровнем земли. Здания крытых моллов должны соответствовать применяемым требованиям данных строительных норм, кроме необходимости выполнения особых требований данного раздела. Исключения составляют фойе и вестибюли группы B и подгрупп R-1 и R-2, которые могут не соответствовать данному разделу, а также здания могут не соответствовать требованиям этого раздела, если они полностью соответствуют другим применяемым требованиям строительных норм.

План арендной площади

После получения свидетельства о приемке здания в эксплуатацию, владелец каждого здания крытого молла должен представить в строительный и пожарный комитеты план арендной площади с указанием расположения каждого помещения с выходами. Без предварительного согласования с представителями строительного надзора не должно производиться никаких изменений в аренде или эксплуатации, указанных на плане арендной площади.

Пути эвакуации

Каждое арендное помещение и здание крытого молла должны иметь пути эвакуации согласно требованиям данной главы.

Определение населенности

Допустимая населенность в любом отдельном арендном помещении в здании крытого молла определяется согласно настоящим нормам. Требования к путям эвакуации для отдельных арендных помещений должно основываться на определенной таким образом населенности.

Расчет населенности

При расчете требуемых путей эвакуации молла число человек, для которых они предназначены, основывается на общей арендной площади здания крытого молла (кроме якорных зданий) и коэффициенте населенности, вычисленном по следующей формуле:

$$OLF = (0{,}00007)\ (GLA) + 25$$

где:

OLF – коэффициент населенности, в м^2 на человека

GLA – общая арендная площадь, м^2

Диапазон коэффициента населенности (OLF) не должен быть меньше 30 и больше 50.

Якорные здания. Населенность якорных зданий, выходящих в молл, не должна включаться в расчет общего числа людей в молле.

Фудкорты. Для определения требований к путям эвакуации для молла населенность фудкорта прибавляется к рассчитанной выше населенности здания крытого молла.

Количество путей эвакуации

Если расстояние до молла от любой точки в пределах арендного помещения, используемого лицами, не относящимися к персоналу, превышает 22860 мм или населенность арендного помещения превышает значение 50, необходимо обеспечить наличие как минимум двух путей эвакуации.

Расположение путей эвакуации

Помещения с населенностью 500 и более человек в здании крытого молла должны располагаться так, чтобы выходы напрямую соединялись с главным входом в молл, и не менее половины необходимых путей эвакуации выходили наружу здания крытого молла.

Необходимые пути эвакуации в якорных зданиях должны быть независимы от системы путей эвакуации молла. Населенность якорных зданий, выходящих в молл, не должна включаться в расчет путей эвакуации молла. Путь эвакуации в молле не должен проходить через якорные здания. Моллы, заканчивающиеся в якорном здании, где отсутствуют другие пути эвакуации, считаются тупиковыми моллами.

Расстояние до выходов

В пределах каждого отдельного арендного помещения в здании крытого молла максимальное расстояние от любой точки до выхода или входа в молл не должно превышать 60960 мм. Максимальное расстояние от любой точки в пределах молла до выхода не должно превышать 60960 мм.

Доступ к выходам

Если необходимо наличие более одного выхода, они должны быть расположены так, чтобы можно было двигаться в любом направлении из любой точки в молле к отдельным выходам. Минимальная ширина выхода или коридора из молла должна составлять 1676 мм. Исключение составляют тупики длиной, не превышающей двойную ширину молла в самом узком месте тупикового участка молла. Если проходы к выходам оснащены дополнительными путями эвакуации из арендного помещения, двери выходов должны быть противопожарными с часовым пределом огнестойкости. Эти двери должны быть автоматическими и оставаться закрытыми или должны закрываться автоматически при обнаружении дыма.

Служебные помещения, выходящие в проходы к выходам

Машинные отделения, электрощитовые, коммуникационные помещения и грузовые лифты могут выходить непосредственно в проход к выходу при условии, что этот проход отделен от данных помещений стенами с часовым пределом огнестойкости и защитными средствами для проемов с таким же пределом огнестойкости.

Ширина молла

С целью обеспечения необходимой эвакуации, моллы могут рассматриваться как коридоры, при этом ширина молла должна соответствовать требованиям данного раздела. Минимальная ширина молла должна составлять 6096 мм. Ширина молла должна быть достаточной для размещения того количества людей, для которого он предназначен. Необходимо обеспечение минимальной свободной ширины 3048 мм и высоты 2438 мм между любой проекцией арендного помещения, граничащего с моллом, и ближайшим киоском, торговым автоматом, скамьей, информационным табло, фудкортом или другим препятствием при движении по пути эвакуации.

Типы конструкций

Типы I и II – типы конструкций, в которых конструктивные элементы состоят из невозгораемых материалов.

Тип III – тип конструкции, при котором внешние стены состоят из невозгораемых материалов, а внутренние элементы здания состоят из любого типа материала, предусмотренного данным стандартом. Огнеупорная деревянная рамная конструкция допускается внутри внешних сборных стен с двухчасовым пределом огнестойкости.

Тип VI – тип конструкции, при котором внешние стены состоят из невозгораемых материалов, а внутренние элементы здания состоят из цельной или многослойной древесины без скрытых пустот. Огнеупорная деревянная рамная конструкция допускается внутри внешних сборных стен с двухчасовым пределом огнестойкости.

Площадь любого здания крытого молла, включая якорные здания с конструкциями типов I, II, III и IV, не должна ограничиваться при условии, что здание крытого молла и прилежащие якорные здания и многоуровневые парковки со всех сторон окружены открытым пространством не менее 18288 мм, а высота якорных зданий не превышает трех этажей.

Огнестойкие преграды

Между арендными помещениями и моллами, а также между фудкортом и прилегающими арендными помещениями наличие огнестойких преград не требуется.

Примыкающая стоянка

Примыкающая стоянка для пассажирского автотранспорта вместимостью не более 9 человек, и открытые многоуровневые парковки рассматриваются как отдельное здание, если они отделены от здания крытого молла противопожарной преградой с как минимум двухчасовым пределом огнестойкости.

Преграды между арендными помещениями

Каждое арендное помещение должно отделяться от других арендных помещений огнестойкой преградой. Между арендным помещением и моллом наличие огнестойких преград не требуется.

Преграды между якорным зданием и зданием крытого молла

Якорное здание должно быть отделено от здания крытого молла огнестойкими стенами. Исключение составляют якорные здания высотой не более трех этажей над уровнем земли, с классификацией населенности такой же, как и у арендаторов здания крытого молла, которые должны быть отделены противопожарными преградами с двухчасовым пределом огнестойкости.

Кроме преград между спальными блоками подгруппы R-1 и моллом, проемы между якорными зданиями с конструкциями типа I и II (см. примечание выше) и моллом не должны быть защищены.

Автоматические спринклерные системы

Здания крытых моллов и смежные с ними здания должны быть полностью оборудованы автоматической спринклерной системой, соответствующей следующим параметрам:

- автоматическая спринклерная система должна быть полной и действующей на всем занимаемом пространстве здания крытого молла до размещения арендаторов в помещениях. Незанятые арендные помещения должны быть защищены аналогичным образом, если они не оснащены альтернативной сертифицированной защитой.
- спринклерная защита молла должна быть независимой от систем защиты арендных помещений или якорных зданий. Если арендные помещения обслуживаются этой же системой, они должны контролироваться отдельно.

Система гидрантов

Здание крытого молла должно быть повсеместно оборудовано системой гидрантов.

Дымоудаление

При необходимости следует предусмотреть систему дымоудаления для атриумов.

Киоски

Киоски и аналогичные им конструкции (постоянные или временные) должны соответствовать следующим требованиям:

- воспламеняемые киоски или другие конструкции не должны размещаться в молле, если они не произведены из следующих материалов: дерева, обработанного антипиреном; пенопласта с максимальной скоростью выделения тепла не более 100 кВт; алюминиевого композитного материала с коэффициентом распространения пожара не более 25 и коэффициентом дымообразования не выше 450.
- киоски или аналогичные им конструкции, расположенные внутри молла, должны оснащаться сертифицированными устройствами обнаружения и тушения пожара.
- минимальная горизонтальное расстояние между киосками или группой киосков и другими конструкциями внутри молла должна составлять 6 метров.
- площадь каждого киоска или аналогичной конструкции или группы киосков должна составлять не более 28 м^2.

Защитные решетки и двери

Горизонтальные раздвижные или вертикальные защитные решетки или двери, являющиеся частью путей эвакуации, должны соответствовать следующим требованиям:

- двери или решетки должны оставаться в полностью открытом положении во время пребывания основной массы людей.
- двери или решетки не должны закрываться, если в помещении с одним выходом находится более 10 человек, или 50 человек в помещении с более чем одним выходом.
- двери или решетки в занимаемом помещении должны открываться изнутри без применения специальных знаний или усилий.
- если требуется наличие двух или более выходов, допускается оснащение не более половины выходов горизонтальными раздвижными или вертикальными подъемными решетками или дверями.

Резервные источники питания

Здания крытых моллов площадью более 4645 м^2 должны оснащаться резервными источниками питания, которые могут привести в действие системы голосового аварийного оповещения/аварийной связи.

Система голосового аварийного оповещения/аварийной связи

Здания крытых моллов с общей площадью помещений более 4645 м^2, должны оснащаться системой голосового аварийного оповещения/аварийной связи. Системы голосового аварийного оповещения/аварийной связи, предназначенные для молла, обязательные или нет, должны быть доступны пожарным подразделениям.

Пластиковые указатели

На каждом этаже или уровне и от стены до стены каждого арендного помещения, выходящего в молл, необходимо наличие пластиковых указателей. Пластиковые указатели не должны занимать более 20% площади стены, выходящей в молл. Высота пластиковых указателей не должна превышать 914 мм, при использовании вертикальных указателей их высота не должна превышать 2438 мм, а ширина – 914 мм. Пластиковые указатели должны размещаться на расстоянии как минимум 457 мм от смежных арендных помещений.

Пластик (за исключением пенопласта)

Применяемый в указателях пластик (за исключением пенопласта) должен быть светопрозрачным или иметь температуру самовозгорания 343°C или выше, с коэффициентом распространения пожара не выше 75, и коэффициентом дымообразования не выше 450. Края и задняя сторона пластиковых указателей в молле должны быть полностью покрыты металлом.

Пенопласт

Применяемый в указателях пенопласт должен соответствовать критериям огнестойкости, так чтобы максимальная скорость выделения тепла составляла 150 кВт. Минимальная плотность применяемого в указателях пенопласта не должна быть менее 320 кг/м^3. Толщина указателей из пенопласта не должна превышать 12,7 мм.

Доступ пожарных подразделений к оборудованию

Помещения или зоны с элементами управления системами кондиционирования, автоматического пожаротушения или другими системами обнаружения и тушения пожара, должны быть соответствующим образом обозначены для их применения пожарными подразделениями.

АТРИУМЫ

Вертикальные проемы, соответствующие требованиям данного раздела, не должны быть ограждены, кроме помещений группы H.

Эксплуатация

Пространство атриума не должно использоваться в целях, представляющих повышенную пожароопасность, и в нем должны применяться только сертифицированные материалы и отделка в соответствии с «Международными пожарными нормами». Исключение: площадь пространства атриума может быть использована в любых целях при условии, что каждое отдельное помещение оборудовано автоматической спринклерной системой.

Автоматические спринклерные системы

Во всем здании необходимо установить сертифицированную автоматическую спринклерную систему. Наличие спринклерной системы не является обязательным требованием в следующих случаях:

- если зона здания, смежная или расположенная над атриумом, отделена от зоны атриума противопожарной преградой с двухчасовым пределом огнестойкости или горизонтальной стеной, или обеими конструкциями.
- если высота пололка атриума выше 16 метров от уровня пола.

Дымоудаление

Система дымоудаления должна быть установлена в соответствии требованиями раздела «Системы противодымной защиты».

Отделение атриумов

Пространства атриумов должны отделяться от смежных помещений противопожарной преградой с часовым пределом огнестойкости. Исключение составляют:

- стеклянные стены, образующие противодымную преграду там, где автоматические спринклеры расположены через каждые 1800 мм и менее вдоль обеих сторон простенка, или на стороне помещения, если на стороне атриума нет галереи, и на расстоянии от 100 мм до 300 мм от стекла, и установлены так, что при активации спринклерной системы вода разбрызгивается по всей поверхности стекла. Стекло должно быть установлено в раму с уплотнителями так, чтобы каркасная система деформировалась без разбиения стекла до активации спринклерной системы.
- стены из стеклоблоков с пределом огнестойкости 45 минут.
- смежные помещения на любых трех этажах атриума, которые необязательно отделять от него, если данные помещения включаются в расчет площади атриума при проектировании системы дымоудаления.

Резервные источники питания

Оборудование, предназначенное для работы системы дымоудаления, должно быть подключено к резервному источнику питания.

Внутренняя отделка

Внутренняя отделка стен и потолков атриума должна быть не ниже класса В (трудновоспламеняемая) без понижения класса в отношении спринклерных систем.

Расстояние до выхода

На любом уровне атриума, кроме самого нижнего, где требуемые пути эвакуации проходят через пространство атриума, расстояние до выхода в пределах пространства атриума не должно превышать 60960 мм.

СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ

Данный раздел посвящен механическим или пассивным системам дымоудаления. Целью данного раздела является установление минимальных требований к проектированию, установке и приемочным испытаниям систем дымоудаления, предназначенных для обеспечения безопасных условий при эвакуации или перемещении людей по зданию. Данные условия не предназначены для сохранения содержимого, своевременного возобновления операций или содействия пожаротушению или ремонтным работам.

Общие требования к проектированию

Здания, конструкции и их части, в которых необходимо иметь систему или системы дымоудаления, должны оснащаться данными системами, спроектированными в соответствии с этим разделом и общепринятыми строительными нормами. Проектно-сметная документация должна включать полную и специальную информацию, необходимую для подробного описания частей конструкций, нужных для надлежащего внедрения систем дымоудаления. К данным документам должна прилагаться сопроводительная документация с полной информацией и расчетами для подтверждения соответствия требованиям настоящего раздела.

Особые проверки и требования к испытаниям

В дополнение к обычным проверкам и требованиям к испытаниям, которым должны соответствовать здания, конструкции и их части, системы дымоудаления необходимо подвергнуть особым проверкам и испытаниям для контроля их надлежащего ввода в эксплуатацию после окончательной установки данных систем. При представлении проекта, сопровождаемого проектно-сметной документацией, необходимо дать четкое описание процедур и методов, используемых для проверки и проведения испытаний, а также элементов системы, которые будут испытываться. Процесс ввода в эксплуатацию должен соответствовать общепринятой инженерно-технической практике, и по возможности, основываться на существующих стандартах для конкретных типов испытаний.

Расчет

Представляемая проектно-сметная документация должна сопровождаться рациональным расчетом задействованных типов систем дымоудаления, методов их работы, поддерживающих их систем, а также используемых строительных технологий. Данный расчет должен учитывать нижеприведенные условия, но не ограничиваться ими.

Эффект тяги

Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы максимально возможный обычный или обратный эффект тяги не оказывал неблагоприятного воздействия на технические характеристики системы. Для

определения максимально возможного эффекта тяги следует учитывать высоту, повышение, историю погодных условий и внутренние температуры.

Тепловой эффект пожара

В соответствии с разделом «Расчетный пожар» необходимо проанализировать плавучесть и расширение под воздействием расчетного пожара. Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы данный эффект не оказывал неблагоприятного воздействия на технические характеристики системы.

Ветровая нагрузка

В проекте необходимо учитывать неблагоприятное воздействие ветра.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования

В проекте необходимо учитывать воздействие систем отопления, вентиляции и кондиционирования на распространение дыма и пожара. В расчете должны учитываться все изменения состояния систем. В проекте необходимо учитывать воздействие пожара на системы отопления, вентиляции и кондиционирования.

Климат

В проекте необходимо учитывать влияние низких температур на системы, имущество и пользователей здания. Приточные и вентиляционные отверстия должны быть расположены таким образом, чтобы препятствовать образованию снежных заносов и ледяных пробок.

Продолжительность работы

Все элементы активных или пассивных систем дымоудаления после обнаружения пожара должны непрерывно работать в течение как минимум 20 минут.

Конструкция дымозащитных преград

Дымозащитные преграды должны быть сконструированы и запаяны для ограничения зон утечки без защищенных проемов. Максимально допустимая площадь утечки должна быть общей площадью, рассчитанной с помощью следующих коэффициентов площади утечки:

Стены: A/A_W = 0,00100

Помещения выходов: A/A_W = 0,00035

Все остальные шахты: A/A_W = 0,00150

Перекрытия и крыши: A/A_F = 0,00050

где:

A – полная площадь утечки, м^2

A_F – единица площади экрана перекрытия или крыши, м^2

A_W – единица площади экрана стены, м^2

Указанные коэффициенты площади утечки не учитывают проемы дверей, раздвижных окон или аналогичных отверстий, которые необходимо включать в расчет полной площади утечки.

Площадь утечки

Полная площадь утечки преграды рассчитывается следующим образом: общая площадь дымозащитной преграды умножается на коэффициент допустимой площади утечки, и прибавляется к площади других отверстий, таких как проемы и раздвижные окна. Соответствие определяется с помощью достижения минимальной разности давления воздуха по обе стороны преграды, и приведения системы в режим дымоудаления для механических систем дымоудаления. Пассивные системы дымоудаления, испытанные при помощи других сертифицированных методов, таких как испытание дверного вентилятора, следует использовать при согласовании с представителем строительного надзора.

Защита проемов

Проемы в дымозащитных преградах должны защищаться автоматически закрывающимися устройствами, запускаемыми с помощью определенных элементов управления для механических систем дымоудаления. Дверные проемы должны защищаться с помощью огнезащитных дверей. Исключение составляют:

- пассивные системы дымоудаления с автоматически закрывающимися устройствами, запускаемые с помощью датчиков дыма;
- стационарные проемы между зонами задымления, защищаемыми при помощи метода подпора воздуха;
- в подгруппе I-2, где такие двери установлены в коридорах, две открывающиеся в обе стороны двери без центральных вертикальных импостов должны быть установлены в комплекте с прозрачными панелями из сертифицированных огнестойких материалов остекления в огнестойких рамах, площадь которых не превышает площадь испытанных дверей. Двери должны иметь небольшие зазоры в пределах стандартных допусков, а также не должны иметь подрезов, жалюзи или решеток. Двери должны оснащаться декоративными деталями, отмечающими места опирания сандрика на кронштейны, ограничителями стойки дверной коробки, притворными планками или притворами на стыковых соединениях, а также автоматическими закрывающимися устройствами. Дверные задвижки не требуются;
- подгруппа I-3;

– проемы между зонами задымления при габаритной высоте потолка 4267 мм и более, и возможностью его обрушения в течение 20 минут в зависимости от мощности расчетного пожара.

Метод подпора воздуха

К основным механическим средствам дымоудаления относится в первую очередь метод разности давлений по обеим сторонам дымозащитных преград. Поддержание безопасной окружающей среды в зоне дымоудаления из очага возгорания не требуется.

Минимальная разность давлений

Минимальная разность давлений по обе стороны дымозащитной преграды должна составлять 0,0124 кПа в полностью оборудованных спринклерными системами зданиях. В зданиях без спринклерной защиты система дымоудаления должна быть спроектирована таким образом, чтобы разность давлений превышала максимальную расчетную разность давлений при расчетном пожаре как минимум в два раза.

Максимальная разность давлений

Максимальная разность давлений по обе стороны дымозащитной преграды должна определяться с помощью усилий для открывания и закрывания дверей. Усилия для открывания и закрывания дверей должны определяться при помощи стандартных инженерных методов по разложению усилий и реакций. Расчетное усилие для открывания и закрывания вращающейся в обе стороны навесной двери вычисляется по следующей формуле:

$$F = F_{dc} + K(WA\Delta P)/2(W-d) \quad (1)$$

где
A – площадь двери, м^2
d – расстояние от дверной ручки до края дверной задвижки, м
F – полное усилие для открывания двери, Н
F_{dc} – усилие, необходимое для преодоления закрывателя двери, Н
K – коэффициент 1,0
W – ширина двери, м
ΔP – расчетная разность давлений, Па

Метод воздушного потока

При согласовании с представителем строительного надзора допускается перенос дыма через стационарные открытые проемы, расположенные между зонами дымоудаления, с использованием метода воздушного потока. Воздушный поток необходимо направить на ограничение переноса дыма из зоны возгорания. Для предотвращения изменения направления потока вследствие вихревых эффектов должна учитываться геометрия проемов.

Скорость

Средняя минимальная скорость по стационарному проему рассчитывается по следующей формуле:

$$v = 119{,}9\left[h(T_f - T_o)/T_f\right]^{1/2} \quad (2)$$

где
h – высота проема, м
T_f – температура дыма, °K
T_0 – температура окружающей среды, °K
v – скорость воздуха, м/мин.

Данный метод не должен использоваться, если объем или скорость воздушного потока окажет неблагоприятное воздействие на работу других элементов системы дымоудаления, будет чрезмерно усиливать пламя, нарушать динамику струи или препятствовать выходу. Скорость воздушного потока по направлению к пламени ни в коем случае не должна превышать значение 1,02 м/с. В случае превышения данного значения скорости воздушного потока при расчете по вышеприведенной формуле, метод регулирования воздушного потока использоваться не должен.

Метод дымоудаления

При согласовании с представителем строительного надзора допускается использование метода дымоудаления посредством механических систем дымоудаления в больших закрытых пространствах, таких как атриумы или моллы.

Скорость дымоудаления

Высота наиболее низкой горизонтальной поверхности накопившегося дымового слоя должна сохраняться на отметке как минимум 3048 мм над любой пешеходной зоной, формирующей часть необходимой системы эвакуации в пределах зоны задымления. Требуемая скорость дымоудаления для данной зоны должна быть наибольшей из расчетных скоростей массового расхода струи для возможных конфигураций струи. Необходимо создать условия для естественной или механической подачи воздуха снаружи или со смежных зон задымления для компенсации удаленного воздуха. Скорость кондиционированного воздушного потока при измере-

нии в потенциальных зонах пожара, не должна превышать 60960 мм/мин по направлению к пламени. Температура кондиционированного воздуха не должна превышать предельные температурные значения термочувствительных систем противопожарной защиты.

Осесимметричные струи

Скорость массового расхода струи в кг/с (m_p) определяется путем размещения расчетного пожара по центру оси анализируемого пространства. Предельная высота пламени рассчитывается по следующей формуле:

$$z_l = 0{,}166 Q_c^{2/5} \quad (3)$$

где

m_p – скорость массового расхода струи, кг/с

Q – полная теплоотдача

Q_c – конвективная теплоотдача, кВт, значение Q_c необходимо брать не менее $0{,}70Q$

Z – высота от верхней поверхности топлива до нижней части дымового слоя, м

z_l – предельная высота пламени, м, значение z_l должно превышать диаметр условного топлива

при $z > z_l$ $m_p = 0{,}071 Q_c^{1/3} z^{5/3} + 0{,}0018 Q_c$

при $z = z_l$ $m_p = 0{,}035 Q_c$

при $z < z_l$ $m_p = 0{,}032 Q_c^{3/5} z$

Для преобразования m_p из кг/с массового расхода в объемный расход, необходимо использовать следующую формулу:

$$V = m_p/\rho \quad (4)$$

где

V – скорость объемного расхода, м^3/с

ρ – плотность воздуха при температуре дымового слоя, кг/м^3 (T в °C)

Струи, проникающие с балкона

Скорость массового расхода струи (m_p) для растекающихся струй определяется путем использования геометрически возможной ширины, основанной на архитектурных элементах и проекциях, по следующей формуле:

$$m_p = 0{,}36 (QW^2)^{1/3} (z_b + 0{,}25H) \quad (5)$$

где

H – высота над пламенем до нижней поверхности балкона, м

m_p – скорость массового расхода струи, кг/с

Q – полная теплоотдача

W – ширина струи в точке растекания, м

Z_b – высота над балконом, м

Струи, проникающие с окон

Скорость массового расхода струи (m_p) определяется по следующей формуле:

$$m_p = 0{,}68(A_w H_w^{1/2})^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 1{,}5 A_w H_w^{1/2} \quad (6)$$

где

A_w – площадь проема, м^2

H_w – высота проема, м

m_p – скорость массового расхода струи, кг/с

z_w – высота от верхней поверхности окна или проема до нижней части дымового слоя, м

$a = 2{,}4 A_w^{2/5} H_w^{1/5} - 2{,}1 H_w$

Соприкосновение струй со стенами

Если струя дыма соприкасается с одной или более из окружающих стен, необходимо скорректировать скорость массового расхода вследствие пониженного вовлечения в результате соприкосновения, при условии непрерывного соприкосновения. Применение данного условия требует расчета диаметра струи по следующей формуле:

$$d = 0{,}48 (T_c/T_a)^{1/2} z \quad (7)$$

где

d – диаметр струи, м

T_a – температура окружающей среды, °K

T_c – температура струи по осевой линии, °K

z – высота, при которой рассчитывается T_c м

$T_c = 0{,}08\ T_a\ Q_c^{2/3}\ z^{-5/3} + T_a$

Расчетный пожар

Расчетный пожар должен основываться на значении Q не менее 5275 кВт, в случае невыполнения рационального расчета лицензированным специалистом по проектированию с последующим его утверждением представителем строительного надзора. Инженерный расчет должен содержать информацию о характеристиках и запасе топлива, последствиях пожара и его стационарности или нестационарности.

Разделительное расстояние

В характеристике расчетного пожара необходимо учитывать тип, объем и состав топлива. Коэффициент разделительного расстояния к радиусу условного топлива должен быть не менее 4. Радиус условного топлива должен быть радиусом круга площадью, равной общей площади набора горючих материалов. Расчетный пожар необходимо усилить, если в пределах разделительного расстояния находятся другие горючие материалы, при этом используется следующая формула:

$$R = [Q/(12\pi q'')]^{1/2} \quad (8)$$

где

q'' – падающий лучистый тепловой поток, необходимый для самопроизвольного возгорания, Вт/м^2

Q – тепловое излучение от пламени, кВт

R – разделительное расстояние от объекта до центра набора горючих материалов, м

Допущения скорости выделения тепла

В расчете необходимо использовать самые современные доступные данные авторитетных источников, и он не должен основываться на абсолютно точных предельных значениях горючего материала.

Допущения эффективности спринклеров

Необходимо предоставить документированный инженерный расчет для условий, при которых заданный рост пожара приостанавливается в момент активации спринклеров.

Оборудование

Оборудование, такое как, вентиляторы, воздуховоды, автоматические дымозащитные клапаны и балансировочные клапаны и другое, должно подходить для целевого использования, а также выдерживать указанные в рациональном расчете и утвержденные представителем строительного надзора возможные температурные воздействия.

Вытяжные вентиляторы

Производитель должен проверять соответствие элементов вытяжных вентиляторов своему классу и испытывать их на предмет воздействия высоких температур, а также сертифицировать. Температура перегрева рассчитывается по следующей формуле:

$$T_s = (Q_c/mc) + (T_a) \quad (9)$$

где

c – удельная теплота дыма при температуре дымового слоя, кДж/кг·K

m – скорость вытяжки, кг/с

Q_c – конвективная теплоотдача пламени, кВт

T_a – температура окружающей среды, °K

T_c – температура дыма, °K

Исключение: достаточный объем подачи свежего воздуха обуславливает низкое значение T_s.

Воздуховоды

Материалы, из которых изготовлены воздуховоды и соединительные элементы, должны выдерживать возможное воздействие высоких температур и давления. Воздуховоды должны проходить испытания на утечку при давлении, как минимум в полтора раза превышающем расчетное давление, в соответствии с общепринятыми нормами. Измеренная утечка не должна превышать 5% от расчетного потока. Результаты проведенных испытаний необходимо вносить в сопроводительную документацию. Воздуховоды должны устанавливаться прямо на огнестойкие конструктивные элементы здания при помощи прочных несгораемых опор. Исключение составляют гибкие соединения с целью обеспечения виброизоляции, изготовленные из сертифицированных огнестойких материалов.

Оборудование, приточные и вытяжные отверстия

Оборудование должно быть расположено таким образом, чтобы не подвергать незадействованные в пожаре части здания дополнительной пожарной опасности. Наружные приточные отверстия необходимо расположить таким образом, чтобы минимизировать вероятность проникновения дыма или огня в здание. Вытяжные отверстия должны быть расположены таким образом, чтобы минимизировать повторное проникновение дыма в здание и ограничить воздействие дополнительной пожарной опасности на здание или смежные здания.

Автоматические дымозащитные клапаны

Необходимо указывать автоматические дымозащитные клапаны вне зависимости от цели их установки в систему дымоудаления, и они должны соответствовать требованиям общепринятых нормативных стандартов.

Вентиляторы

Количество вентиляторов с ременным приводом должно в полтора раза превышать количество используемых в расчетных целях вентиляторов, при минимальном наличии двух штук. Вентиляторы необходимо выбирать при условии их надежной работы под воздействием обычных и, если требуется, высоких температур. Выполненные производителем расчеты и кривые работы вентиляторов необходимо вносить в сопроводитель-

ную документацию. Вентиляторы должны поддерживаться и устанавливаться при помощи несгораемых устройств. Вентиляторы с моторным приводом не должны работать сверх номинальной мощности (кВт) согласно данным замеров потребления тока, при минимальном коэффициенте характера нагрузки 1,15.

Источники питания

Система дымоудаления должна оснащаться двумя источниками питания. Основным источником питания может служить стандартная система питания здания. В качестве резервного источника питания можно использовать соответствующую нормам сертифицированную систему резервного питания. Резервный источник питания с переключателями должен находиться в отдельном помещении без стандартных трансформаторов питания и распределительных устройств. Данное помещение должно состоять из противопожарных преград с часовым и более пределом огнестойкости, вентилируемых изнутри и снаружи. Распределение энергии от двух источников должно производиться независимо друг от друга. Полный переход на резервный источник питания должен осуществляться автоматически в течение 60 секунд после отключения основного источника питания.

Источники питания и скачки напряжения

Элементы системы противодымной защиты, работающие с использованием энергозависимых запоминающих устройств, должны быть оборудованы источниками бесперебойного питания достаточной мощности для обеспечения непрерывной работы системы при отключении основного источника питания на 15 минут. Чувствительные к скачкам напряжения элементы системы противодымной защиты должны соответствующим образом защищаться с помощью кондиционных установок, устройств защиты от перегрузок и других сертифицированных методов.

Системы управления и обнаружения пожара

Системы обнаружения пожара должны передавать входные и выходные сигналы на механические системы дымоудаления или элементы этих систем. Данные системы необходимо оборудовать устройством управления, относящимся к оборудованию дымоудаления. Системы управления для механических систем дымоудаления должны соответствовать требованиям процесса верификации. В процесс верификации входит подтверждение выполнения запуска, тестирования, работы ручного управления, наличия перепадов напряжения и отключений, а также создание письменного графического отчета об аномальных условиях эксплуатации с использованием предварительно запрограммированного еженедельного отчета по циклу испытаний.

Электропроводка

Вся электропроводка вне зависимости от напряжения должна полностью защищаться сплошными кабельными проводами.

Запуск систем дымоудаления

Механические системы дымоудаления, использующие метод подпора воздуха, регулирования воздуха или метод дымоудаления, должны иметь полное автоматическое управление. Допускается использование пассивных систем дымоудаления, запускаемых с помощью сертифицированных датчиков дыма.

Автоматическое управление

При использовании или необходимости использования полного автоматического управления, цепочки автоматического управления должны запускаться автоматической спринклерной системой. Кроме этого, необходимо обеспечить доступ пожарных подразделений к ручному управлению, а также наличие датчиков дыма для проведения инженерных расчетов.

Регулирующие воздуховоды

Регулирующие воздуховоды должны быть достаточного размера для обеспечения необходимого быстрого срабатывания. Трубопроводы должны быть начисто промыты и высушены до их окончательного соединения, а также должны соответствующим образом крепиться и защищаться от повреждений. Трубопроводы, проходящие через бетонную или каменную кладку, должны иметь рукава и защищаться от абразивного износа и электролитического воздействия.

Материалы

Регулирующие воздуховоды должны изготавливаться из твердотянутой меди типа L. Обвязка должна состоять из кованой меди или ковкой бронзы с припоем. Изменение направления должно осуществляться при помощи соответствующих изгибающих инструментов. Для окончательного соединения устройств необходимо использовать латунную обвязку сжимающего типа, остальные соединения должны быть сварены при помощи сплава для твердой пайки BCuP5 с солидусом выше 593°C при температуре жидкостей ниже 816°C. Для соединений медь-латунь необходимо использовать только паяльный флюс. Исключение составляют неметаллические трубопроводы, используемые в панелях управления и при окончательном соединении с устройствами, при условии соблюдения следующих условий:

- трубопроводы должны быть сертифицированными и соответствовать требуемым пожарным и дымовым характеристикам.

- трубопроводы и подключенные устройства должны быть полностью защищены в пределах оцинкованного или помещения из окрашенной высококачественной стали толщиной не менее 0,76 мм (оцинкованных калиберных пластин из листового металла №22). Вход в помещение должен быть из медных трубопроводов с защитной неопреновой или тефлоновой пеньковой прядью, или соответствующих латунных прокладок к неизолированному штепсельному переходнику.
- трубопроводы необходимо идентифицировать в соответствии с документированной маркировкой.
- трубопроводы должны быть аккуратно соединены и держаться на опорах в пределах помещения. Трубопроводы, соединяющие помещение с дверью или подвижным устройством должны быть достаточной длины во избежание растяжения и перенапряжения. Трубопроводы необходимо защищать от абразивного износа. Трубопроводы, идущие к устройствам на дверях, должны закрепляться вдоль петель.

Отключение других функций

Регулирующие воздуховоды, не предназначенные для функций дымоудаления, должно быть отключены с помощью автоматических запорных клапанов или должны представлять собой независимую систему.

Проведение испытаний

Перед окончательным подключением к устройствам регулирующие воздуховоды необходимо испытывать при давлении, в три раза превышающем рабочее давление в течение как минимум 30 минут, без значительных потерь манометрического избыточного давления.

Маркировка и идентификация

Системы обнаружения пожара и дымоудаления должны быть четко промаркированы на всех соединениях, проходах и выходах.

Схемы управления

Одинаковые схемы управления, показывающие все устройства в системе с указанием их местоположения и функций, необходимо периодически обновлять и оставлять на хранение представителям строительного надзора и пожарного подразделения, экземпляр также должен быть в пожарном пункте. Форма и формат схемы управления должны быть утверждены начальником пожарного управления.

Панель управления системой дымоудаления для пожарных

Необходимо наличие панели управления системой дымоудаления для пожарных с целью быстрого реагирования пожарных подразделений, которая должна включать ручное управление или отключать автоматическое управление для механических систем дымоудаления. Панель должна находиться в пожарном пункте.

Системы дымоудаления

На панели управления системой дымоудаления для пожарных должны отображаться расположенные в пределах здания вентиляторы, а также иметься точное указание направления воздушных потоков и взаимосвязь элементов системы. Необходимо наличие индикаторов состояния всего оборудования по дымоудалению, запускаемого вентиляторами и зонами, а также индикаторами (светосигнализаторами). Индикаторы состояния имеют следующее цвета:

- вентиляторы, дымозащитные клапаны и другое рабочее оборудование в стандартном состоянии – БЕЛЫЙ.
- вентиляторы, дымозащитные клапаны и другое рабочее оборудование в отключенном или закрытом состоянии – КРАСНЫЙ.
- вентиляторы, дымозащитные клапаны и другое рабочее оборудование во включенном или открытом состоянии – ЗЕЛЕНЫЙ.
- вентиляторы, дымозащитные клапаны и другое рабочее оборудование в неисправном состоянии – ЖЕЛТЫЙ.

Панель управления дымоудалением

Панель управления системой дымоудаления для пожарных должна предоставлять доступ к управлению всем оборудованием системы дымоудаления в здании. Существуют следующие режимы управления:

- ВКЛ–АВТО–ВЫКЛ. Элемент управления каждым отдельным компонентом рабочего оборудования системы дымоудаления, управление которым также можно осуществлять с других источников в здании. Данными элементами можно управлять следующими компонентами: вентиляторами подпора воздуха на лестницах, вентиляторами дымоудаления, вентиляторами подачи и обратной подачи воздуха, вытяжными вентиляторами, вентиляторами шахт лифтов и другим рабочим оборудованием, используемом или предназначенном для дымоудаления.
- ОТКРЫТО–АВТО–ЗАКРЫТО. Элемент управления отдельными дымозащитными клапанами для дымоудаления, управление которыми также можно осуществлять с других источников в здании.
- ВКЛ–ВЫКЛ или ОТКРЫТО–ЗАКРЫТО. Элемент управления дымоудалением и другим необходимым оборудованием, связанным с пожаром или критической ситуацией с дымом, управление которым можно осуществлять только с панели управления системой дымоудаления для пожарных.

Исключение составляют комплексные системы, в которых элементы управления и индикаторы объединены в одном устройстве для управления и индикации всех компонентов каждой отдельной дымовой зоны, а также

комплексные системы с компьютеризированным управлением при помощи специального интерфейса для ввода определенных несложных команд на английском языке.

Режимы управления и приоритеты

Панель управления для пожарных должна обеспечивать следующие режимы управления:

- ВКЛ–ВЫКЛ, ОТКРЫТО–ЗАКРЫТО. Данные элементы управления должны иметь наибольший приоритет с любого пункта управления в здании. Если задача уже запущена с панели управления для пожарных, автоматическое или ручное управление с любого другого пункта управления в здании не должно помешать выполнению этой задачи. Если для изменения стандартной неаварийной работы оборудования или достижения особого результата для защиты здания или оборудования предоставляются автоматические средства (т.е. морозозащитные термостаты воздуховодов, датчики дыма воздуховодов, высокотемпературные предохранители, термоустройства и аналогичные устройства), необходима возможность отмены данных автоматических средств с помощью панели управления для пожарных. Приоритет должен иметь последний выбранный режим управления, указанный положением каждого переключателя на панели управления для пожарных. Ни в коем случае режимы управления не должны требовать одновременного запуска системой дымоудаления более одной конфигурации.
- Только положение АВТО каждого трехпозиционного переключателя панели управления для пожарных должно запускать автоматический или ручной режим управления с других пунктов управления в здании. Положением АВТО считается СТАНДАРТНОЕ, неаварийное положение управления зданием. Если панель управления для пожарных находится в положении АВТО, вышеописанный индикатор состояния должен указывать состояние устройства в реальном времени (вкл, выкл, открыто, закрыто).
- Если для включения аварийного положения подается автоматический сигнал, СТАНДАРТНОЕ положение должно стать аварийным положением для данного устройства или группы устройств в пределах зоны. Ни в коем случае режимы управления не должны требовать одновременного запуска системой дымоудаления более одной конфигурации.

Время срабатывания системы

Активация системы дымоудаления должна осуществляться немедленно после получения соответствующей автоматической или ручной команды активации. Системы дымоудаления должны активировать отдельные компоненты, такие как дымозащитные клапаны и вентиляторы, в последовательности, необходимой для предотвращения механического повреждения вентиляторов, дымозащитных клапанов, воздуховодов и другого оборудования. В целях дымоудаления время срабатывания панели управления для пожарных должно быть одинаковым для автоматического или ручного запуска дымоудаления, осуществляемого с любого другого контрольного пункта в здании. Общее время срабатывания, включая время, необходимое для обнаружения, отключения рабочего оборудования и запуска системы дымоудаления, должно быть достаточным для достижения режима полного функционирования до того, как условия в помещении превысят расчетные условия задымления. Время срабатывания системы для каждого компонента и их последовательного взаимодействия должно быть точно указано в необходимом рациональном расчете, и верификация установленного состояния компонентов должна описываться в требуемом окончательном отчете.

Приемочные испытания

Устройства, оборудование, их компоненты и последовательности должны испытываться отдельно. Данные испытания должны состоять из определения функций, последовательности и, если требуется, технических характеристик оборудования в его установленном состоянии.

Устройства обнаружения пожара

Датчики дыма или пожарные датчики, являющиеся частью системы дымоудаления, должны испытываться в их установленном состоянии. Если требуется, испытание должно включать верификацию расхода воздуха, как при максимальных, так и при минимальных условиях.

Воздуховоды

Воздуховоды, являющиеся частью системы дымоудаления, необходимо испытывать в режиме обратной подачи воздуха с использованием общепринятой практики для определения реального объема воздуха.

Дымозащитные клапаны

Дымозащитные клапаны должны испытываться на предмет функционирования в их установленных состояниях.

Приточные и вытяжные отверстия

Информация с приточных и вытяжных отверстий должна считываться с использованием общепринятой практики для определения реального объема воздуха.

Вентиляторы

Вентиляторы необходимо проверить на исправность вращения, а также замерить напряжение, силу тока, число оборотов в минуту и натяжение ремня.

Дымозащитные преграды

При помощи наклонных манометров или других сертифицированных откалиброванных измерительных устройств необходимо замерить разность давлений по обе стороны дымозащитных преград. Данные замеры должны производиться для каждого возможного состояния дымоудаления.

Элементы управления

Каждая зона задымления, оборудованная устройством с автоматическим запуском, должна срабатывать при запуске одного их таких устройств. Каждое дополнительное устройство в пределах зоны должно проверяться на аналогичную систему функционирования, без запуска двигателей вентиляторов в целях недопущения возможных повреждений. Последовательность управления должна проверяться во всей системе, включая верификацию команды отмены с панели управления для пожарных, а также моделирование эксплуатации в условиях работы резервного источника питания.

Особые проверки систем дымоудаления

Системы дымоудаления должны испытываться под особым контролем. Особые проверки необходимо проводить на следующих этапах:

- во время установки воздуховодов и до их маскирования, в целях проведения испытаний на утечку и записи местоположения устройства.
- до ввода в эксплуатацию и при завершении всех необходимых работ, в целях проведения испытаний на разность давлений, замеров потока, обнаружение и проверку верификации.

Учреждения, специализирующиеся на проверке систем дымоудаления, должны обладать соответствующей компетенцией в сфере противопожарной защиты и технического проектирования, а также иметь сертификаты специалистов по проверке баланса воздухообмена. Сотрудник учреждения, специализирующегося на проверке систем дымоудаления, или само учреждение должно подготовить полный отчет об испытаниях. В отчете должна быть представлена следующая информация: идентификация всех устройств производителем, паспортные данные, расчетные параметры, измеренные значения и маркировочная этикетка или знак. Соответствующий лицензированный специалист в области проектирования должен проверить отчет, и при подтверждении соответствия отчета задачам проектирования, данный специалист должен указать в отчете дату, поставить печать и подпись. Один экземпляр окончательного отчета должен заполняться представителем строительного надзора, и идентичный экземпляр должен храниться в установленном помещении здания.

Идентификация и документация

Технологические карты, чертежи и другая документация, идентифицирующая и указывающая местоположение каждого компонента системы дымоудаления, а также описывающая надлежащее функционирование системы и требования к техническому обслуживанию, должна храниться в файлах и прилагаться к вышеописанному отчету. Устройства должны иметь сертифицированные маркировочные этикетки или знаки, соответствующие требуемой документации, также на устройствах необходимо указывать дату и инициалы специалиста, который провел последнее успешное испытание.

Приемка системы

Выдача документов на ввод здания или его частей в эксплуатацию не происходит до тех пор, пока представитель строительного надзора не подтвердит полное соответствие здания условиям данного раздела, и пожарное подразделение не получит положительного заключения по функционированию системы как в автоматическом, так и в ручном режиме. В зданиях с поэтапным строительством при согласовании с представителем строительного надзора допускается выдача временных документов на ввод здания или его частей в эксплуатацию при условии, что эти части здания для эксплуатации соответствуют условиям данного раздела, и оставшиеся части не представляют большой угрозы безопасности для данных частей или прилегающих зданий.

Дымонепроницаемые помещения

Дымонепроницаемое помещение должно состоять из защищенной внутренней входной лестницы и наружного балкона или проветриваемого холла. Если требуется доступ на крышу, проход должен осуществляться по дымонепроницаемому помещению, если таковое необходимо.

Проходы

Проход к лестнице должен осуществляться по холлу или наружному открытому балкону. Минимальная площадь холла должна быть не меньше необходимой ширины коридора, ведущего в холл, при ширине не менее 1,1 метра и длине не менее 1,8 метра по направлению к выходу.

Конструкции

Дымонепроницаемое помещение должно отделяться от остальной части здания при помощи противопожарной преграды с как минимум двухчасовым пределом огнестойкости без проемов, кроме дверных проемов для путей эвакуации. Холл должен отделяться от лестницы при помощи противопожарной преграды с как минимум двухчасовым пределом огнестойкости. Наружный открытый балкон должен быть сконструирован в соответствии с требованиями по огнестойкости для конструкций перекрытий. Двери дымонепроницаемого помещения должны быть автоматическими или должны закрываться автоматически при срабатывании датчика

дыма, установленного у бокового входа с этажа в дымонепроницаемое помещение. Срабатывание датчика дыма на любой из дверей должно запускать доводчики на всех дверях в дымонепроницаемых помещениях на всех этажах.

Альтернатива естественной вентиляции

Условия данного раздела необходимо соблюдать в случае естественной вентиляции дымонепроницаемых помещений. Если проход на лестницу осуществляется по наружному открытому балкону, балконная дверь должна соответствовать защитным противопожарным характеристикам. Если проход на лестницу осуществляется через холл, дверь в холл должна соответствовать защитным противопожарным характеристикам. Дверь из холла на лестницу должна иметь предел огнестойкости не менее 20 минут. Минимальная полезная площадь проема в стене каждого холла, выходящего во двор перед зданием, двор или пешеходный проход, должна составлять 1,5 $м^2$ при ширине 6096 мм.

Альтернатива механической вентиляции

Условия данного раздела необходимо соблюдать в случае механической вентиляции дымонепроницаемых помещений. Дверь из здания в холл должна соответствовать защитным противопожарным характеристикам. Дверь из холла на лестницу должна иметь предел огнестойкости не менее 20 минут. Дверь из здания в холл должна обрабатываться уплотнителем или другими материалами для минимизации утечки воздуха.

Вентиляция в холле

В холле должен осуществляться как минимум один воздухообмен в минуту, при этом объем вытяжки должен составлять не менее 150% объема подачи воздуха. Подача и вытяжка воздуха в и из холла должна осуществляться при помощи отдельных плотно соединенных предназначенных для этого воздуховодов. Приточный воздух должен подаваться в холл на высоту до 150 мм от уровня пола. Верхняя часть регулируемой вытяжной решетки должна быть расположена на расстоянии не более 150 мм от верхней части дымоуловителя, и должна полностью находиться в пределах зоны дымоуловителей. Открытые двери не должны блокировать отверстия воздуховодов. В целях соответствия техническим требованиям допускается использование регулирующих дымозащитных клапанов в отверстиях воздуховодов, в противном случае наличие данных клапанов необязательно.

В случае использования специально спроектированной системы, она должна вытягивать воздух в объеме равном, но не меньшем 90 воздухообменов в час, из любого холла в режиме аварийной ситуации, и иметь размеры, необходимые для одновременной работы в трех холлах. Датчики дыма должны располагаться у бокового входа с этажа в каждый холл, и запускать систему в соответствующем холле.

Дымоуловители

Потолок холла должен быть как минимум на 508 мм выше дверного проема в холл, чтобы служить в качестве дымо- и теплоуловителя, а также обеспечивать движение воздушных потоков вверх. Данная высота не должна уменьшаться, если это не утверждено и не доказано расчетным путем или проведением испытаний.

Система движения воздуха на лестничных клетках

Лестничные клетки должны быть оборудованы выпускным вентиляционным отверстием, и на них необходима подача достаточного объема воздуха для поддержания на лестничной клетке минимального избыточного давления 25 Па, при этом клетка должна выходить в холл с закрытыми дверями.

Альтернатива подпору воздуха на лестницах

Если здание по всей своей площади оборудовано автоматической спринклерной системой, наличие холла не требуется, при условии, что на внутренних входных лестничных клетках создается подпор воздуха при давлении от минимум 37 Па до максимум 87 Па. Давление должно измеряться при всех закрытых дверях на лестницы и при максимальном ожидаемом давлении в вентиляционных трубах.

Вентиляционное оборудование

Запуск вентиляционного оборудования должен осуществляться при помощи датчиков дыма, установленных на каждом этаже в определенном месте у входа в дымонепроницаемое помещение. При срабатывании закрывающего устройства на лестничной клетке и дверях в холл путем запуска датчиков дыма или аварийного отключения питания, в соответствующем режиме должно начать функционировать механическое оборудование.

Вентиляционные системы

Вентиляционные системы дымонепроницаемых помещений не должны зависеть от других вентиляционных систем здания. Оборудование и система воздуховодов должны соответствовать одному из следующих требований:

- располагаться снаружи здания и напрямую соединяться с дымонепроницаемым помещением, или соединяться с дымонепроницаемым помещением при помощи системы воздуховодов, защищенной противопожарными преградами с двухчасовым пределом огнестойкости.

- располагаться в пределах дымонепроницаемого помещения с воздухозаборником или вытяжным отверстием для направления воздуха изнутри наружу, или через систему воздуховодов, защищенную противопожарными преградами с двухчасовым пределом огнестойкости.
- располагаться в пределах здания, если они отделены от остальной части здания, включая другое механическое оборудование, при помощи противопожарных преград с двухчасовым пределом огнестойкости.

Резервные источники питания

Механические вентиляционные системы в холлах и на лестничных клетках, а также автоматические системы обнаружения пожара должны работать от сертифицированной резервной системы электропитания.

Приемка и проведение испытаний

Перед сертификацией механического оборудования в присутствии представителя строительного надзора система должна пройти испытания для подтверждения ее функционирования в соответствии с требованиями данного раздела.

Системы дымоудаления в подземных зданиях

Для подземных зданий система дымоудаления должна предоставляться в соответствии с требованиями данного раздела. Если необходимо разделение на отсеки, каждый отсек должен быть оборудован отдельной системой дымоудаления с автоматическим запуском и возможностью ручного управления. Система должна быть достаточно мощной для обеспечения подачи воздуха и дымоудаления как минимум 6 воздухообменов в час. Система дымоудаления должна срабатывать в отсеке с очагом возгорания при помощи следующих независящих друг от друга элементов:

- двух датчиков дыма, пересекающихся в пределах одной защищаемой зоны с помощью одного датчика дыма, контролируемого зоной проверки сигнала тревоги или аналогичным проверенным методом.
- автоматической спринклерной системы.
- ручных элементов управления, всегда доступных пожарным подразделениям.

Запуск системы дымоудаления должен активировать звуковой сигнал тревоги в пределах часто посещаемой зоны.

РУКОВОДСТВО К IBC 2003. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЕ

Информация о мощности пожара и тепловыделении приведена в данной главе на основе книг Д. Эванса и Дж. Клоута «Требования к противодымной защите в Международных строительных нормах 2003 года» [7], Эндрю Бученена «Противопожарное проектирование конструкций» [5], а также стандартов Национальной ассоциации по противопожарной защите (США) NFPA 92B «Руководство по системам противодымной защиты атриумов, торговых центров и больших помещений» [4] и NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации» [3].

В противодымной защите одним из наиболее важных факторов при пожаре в здании является скорость выделения тепла. Со скоростью выделения тепла напрямую связаны температура и объем газов, выделяемых при пожаре, поэтому прогнозирующие компьютерные модели используют во входных данных параметр «скорость выделения тепла». Говоря о мощности пожара, специалисты практически всегда используют термин «скорость выделения тепла». В данной главе под термином «*мощность пожара*» подразумевается скорость выделения тепла.

Целью данной главы является предоставление основной информации о мощности и развитии пожара, которая будет полезна при оценке и определении расчетных пожаров. Расчетный пожар – это такой пожар, противостоять силе которого входит в задачу системы противодымной защиты. В данной главе также рассматриваются спринклеры, так как зачастую именно их наличие играет решающую роль при определении расчетного пожара. Расчетный пожар может быть как стационарным, так и нестационарным. Не являясь физически реальным, стационарный пожар может использоваться в расчетах с запасом для упрощения конструкторского анализа.

СТАДИИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА

Пожары в комнатах и других помещениях всегда описываются с использованием стадий развития пожара, представленных на рис.1. Данные стадии являются удобными при обсуждении пожаров, но большинство пожаров не проходят через все эти стадии по причине недостаточного количества топлива или благодаря работе системы пожаротушения.

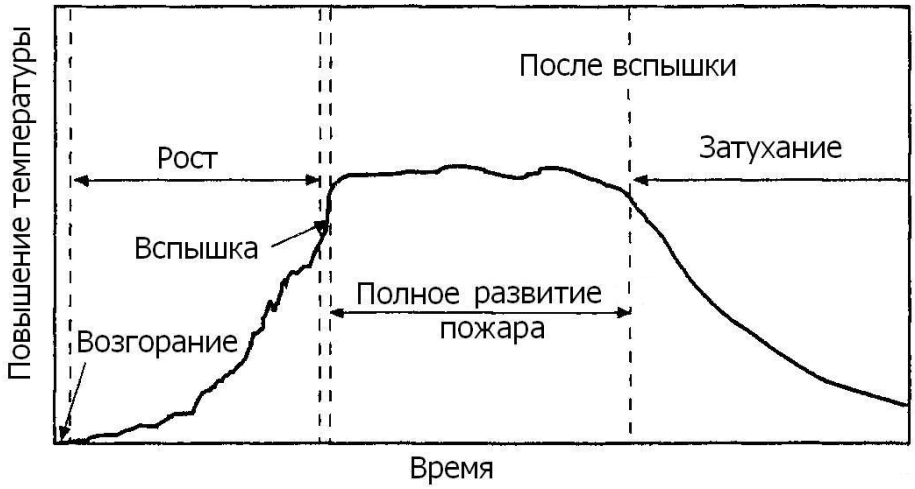


Рис. 1 Стадии развития пожара

Различают следующие стадии развития пожара:

Возгорание – это начальный период развития пожара. Противодымная защита направлена на борьбу с последствиями пожара после возгорания, а не с причинами возгорания.

Рост – это период после возгорания. Рост пожара характеризуется горением материалов вне зависимости или в незначительной зависимости от типа помещения, а также наличием избытка воздуха при пожаре. По мере роста пожара, температура в помещении повышается. Пожар с достаточным объемом воздуха для горения называется «*регулируемым нагрузкой пожаром*», а также пожаром в *свободной воздушной среде*.

Вспышка – это резкий переход из состояния условного стационарного пожара, ограниченного относительно небольшим пространством, в пожар, распространившийся на значительно большее пространство, например охвативший всё помещение. В очень большом помещении, таком как при свободной планировке офиса, лишь в части помещения может произойти вспышка. Обычно вспышка происходит при температуре дымового слоя в пределах от 500°C до 700°C. Показателем вспышки иногда является температура дымового слоя 600°C или лучистый тепловой поток в 20 кВт/м^2 на уровне пола комнаты, где происходит пожар.

Полное развитие пожара – это стадия развития пожара с достижением максимальных температурных отметок. Для небольших и средних помещений скорость выделения тепла при полностью развившемся пожаре зависит от объема доступного воздуха. Данный тип полностью развившегося пожара называется «*регулируемым вентиляцией*». При регулируемом вентиляцией пожаре, горящие материалы выделяют больше летучих газов, которые могут гореть в комнате при доступном объеме кислорода, и пожар может характеризоваться пламенем с содержанием летучих газов, распространяющихся через открытые дверные проемы помещения, где происходит пожар. В очень больших помещениях, таких как при свободной планировке этажа офиса, пожар не обязательно становится регулируемым вентиляцией. Стадия полного развития пожара характеризуется неэффективным горением и высокой концентрацией угарного газа (см. таблицу 1).

Затухание – это стадия завершения горения топлива, при котором происходит снижение температуры и скорости выделения тепла в помещении. При этом, характер пожара может измениться с регулируемого нагрузкой на регулируемый вентиляцией. Строго говоря, термин «*пожар после вспышки*» включает обе стадии: полное развитие пожара и его затухание, но зачастую данный термин используется для обозначения только полностью развившегося пожара.

Таблица 1. Приближенные значения концентрации CO при пожарах в помещениях

	Концентрация CO [1]
Пожары в «свободной воздушной среде»	0,04
Полностью развившийся пожар (в комнате без содержания целлюлозных материалов на потолке или верхней части стен) [2]	0,2

[1] Концентрация CO – соотношение CO (в граммах), выделяемого на единицу топлива (в граммах) при сгорании.

[2] При полностью развившемся пожаре в помещениях с содержанием целлюлозных материалов (древесины, бумаги, картона и т.д.) на потолке или верхней части стен, ожидаемая концентрация CO будет в несколько раз выше представленных данных.

СКОРОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ГОРЕНИИ РАЗНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Скорость выделения тепла в основном измеряется при горении предмета в лаборатории с использованием калориметра для измерения поглощения кислорода, открытого со всех сторон без ограничения движения воздушных потоков к огню. На скорость выделения тепла материалами, горящими при реальных пожарах, в некоторой степени влияет лучистое взаимодействие с окружающей средой. Несмотря на то, что калориметр для измерения поглощения кислорода ограничивает лучистое взаимодействие, лабораторные данные о скорости выделения тепла часто используются в качестве основы для стадии роста расчетного пожара.

На рис.2–10 представлена скорость выделения тепла при горении разных предметов. При горении парных предметов наблюдаются отклонения значений скорости выделения тепла, как это показано на рис.2 при пожаре в трех киосках. Размер этих киосков относительно небольшой, длина стороны составляла 1,22 метра. Специалисты лаборатории сконструировали эти киоски и заполнили их футболками с целью моделирования ситуации, приближенной к реальной. На отклонение значений скорости выделения тепла повлияли следующие факторы: (1) незначительные различия в размещении футболок, (2) различия в составе футболок, (3) различия в размерах киоска, (4) различия в материалах, из которых собраны киоски, и (5) различия в воздушных потоках около киоска. Однако формы кривых и максимальные значения скорости выделения тепла при горении киосков оказались сходными.

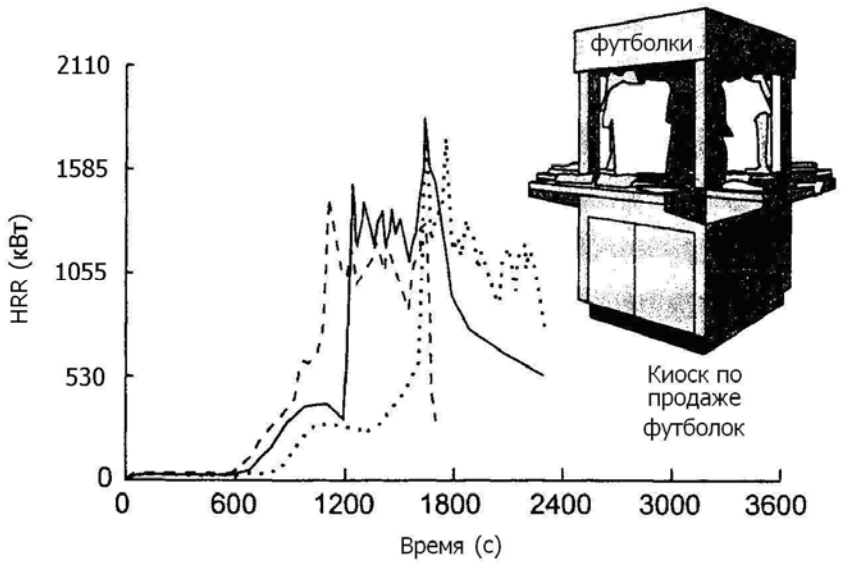


Рис. 2 Скорость выделения тепла (HRR) при горении трех киосков (пример типичной повторяемости горения материалов)

Как показано на рис.3, максимальные значения скорости выделения тепла при горении рождественской елки (сосны обыкновенной) варьировались в пределах от 1900 до 5275 кВт. В другом испытании при горении менее крупных елей максимальные значения скорости выделения тепла варьировались от 45 до 655 кВт. При горении всех рождественских елок наблюдался быстрый рост пожара с последующим затуханием по мере сгорания дерева. Пожары, связанные с возгоранием рождественских елок, представляют особый интерес из-за потенциальной возможности распространения пламени на другие предметы.

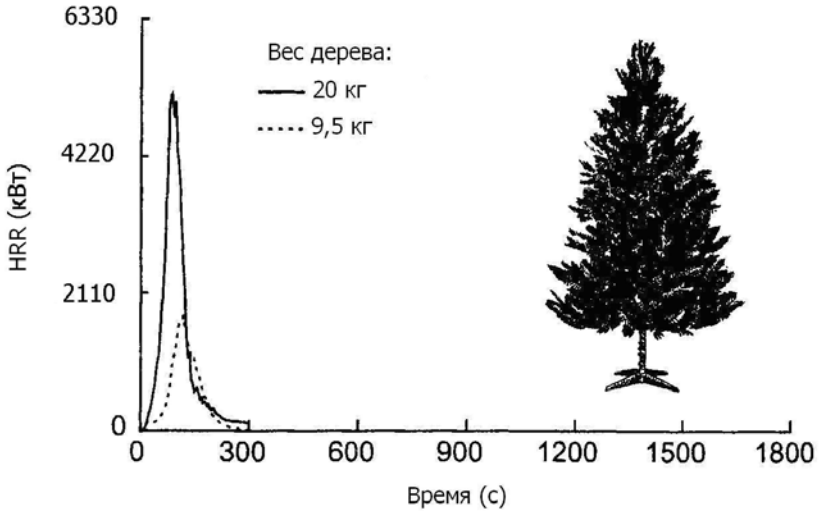


Рис. 3 Скорость выделения тепла (HRR) при горении рождественской елки (сосны обыкновенной)

На рис.4–8 представлена скорость выделения тепла при горении разных видов мебели. На рис.9 представлена скорость выделения тепла при горении рабочих мест. Это смоделированные рабочие места в офисе со следующей комплектацией: кресло, рабочий стол с полками или без, бумага, персональный компьютер и перегородки, отделяющие рабочее место от остального пространства.

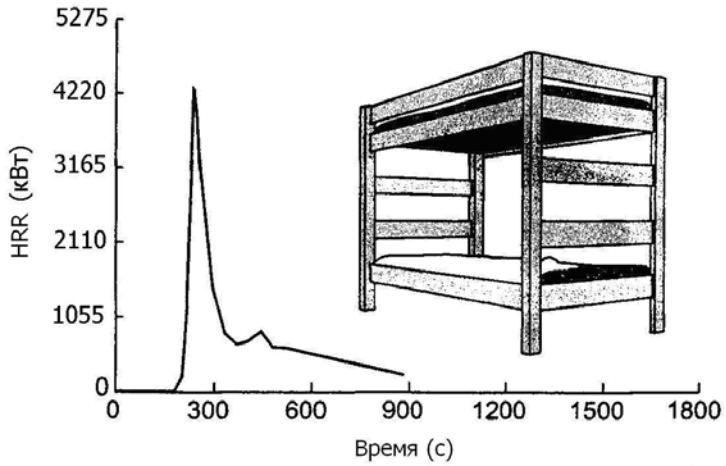


Рис. 4 Скорость выделения тепла (HRR) при горении двухъярусной кровати

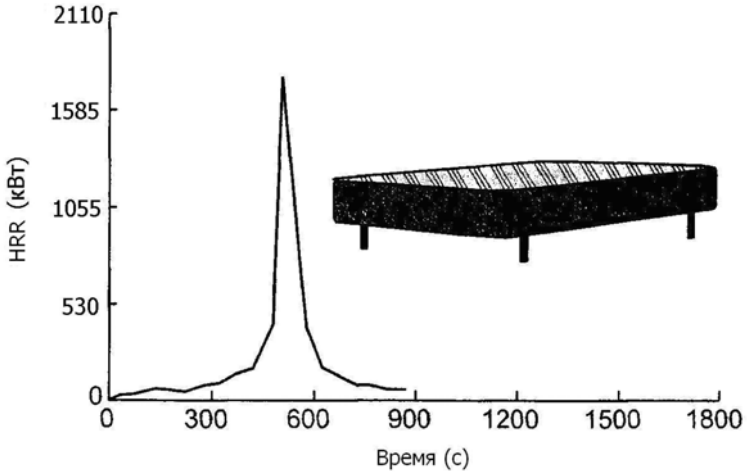


Рис. 5 Скорость выделения тепла (HRR) при горении пружинного матраса с наполнителем из пенополиуретана

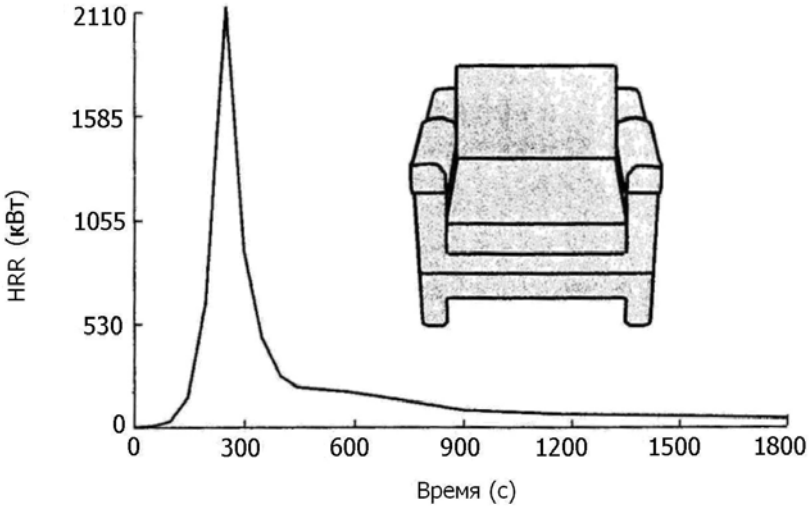


Рис. 6 Скорость выделения тепла (HRR) при горении кресла весом 28,3 кг с мягкой обивкой и наполнителем из пенополиуретана

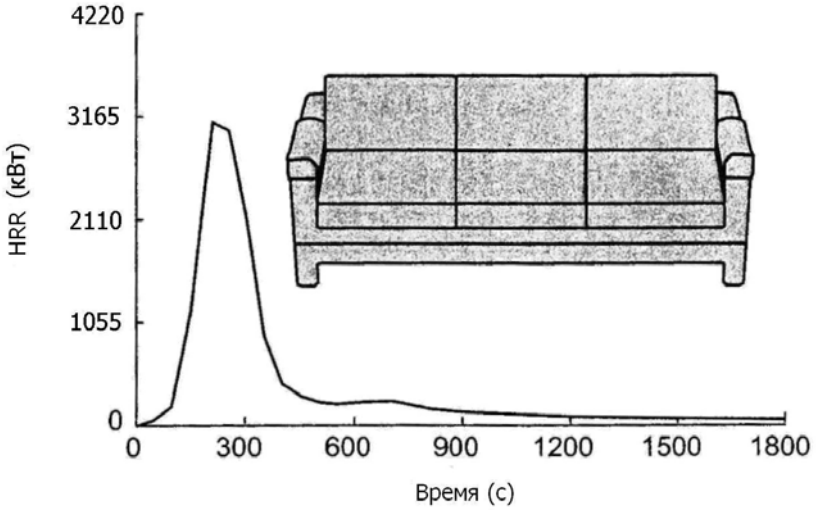


Рис. 7 Скорость выделения тепла (HRR) при горении дивана с наполнителем из пенополиуретана

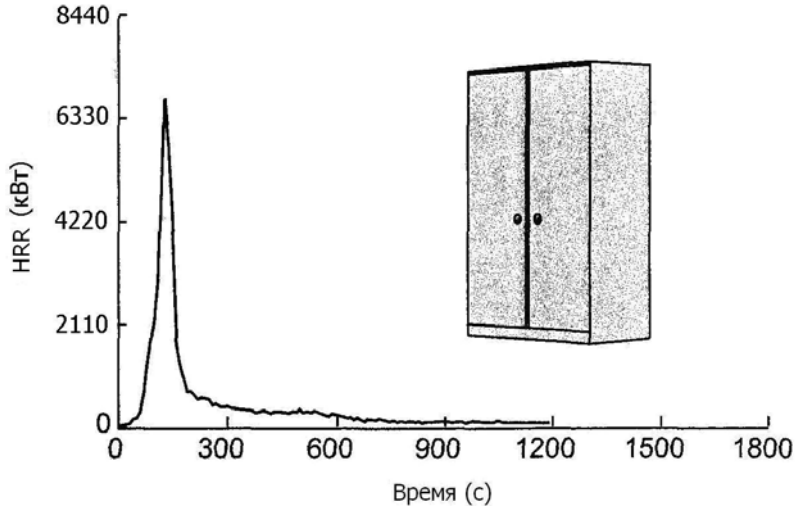


Рис. 8 Шкаф, изготовленный из фанеры толщиной 3,2 мм, с вещами из хлопка и полиэстера

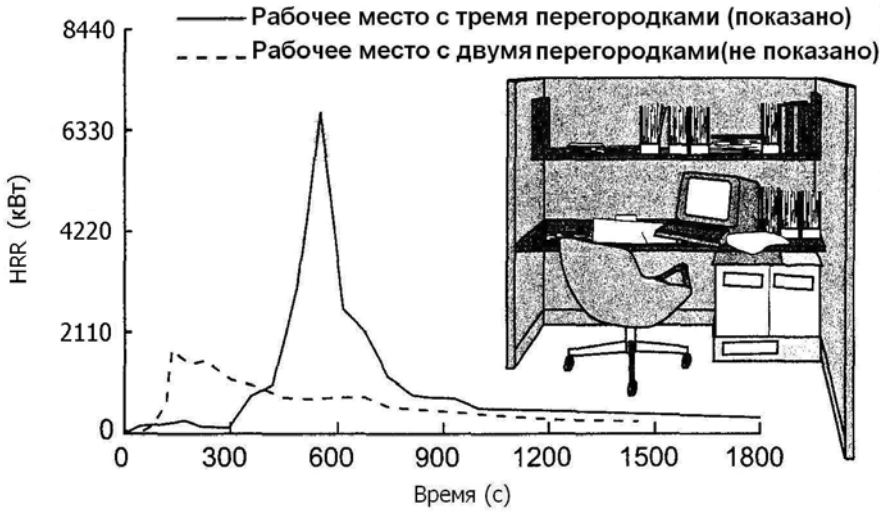


Рис. 9 Рабочее место с тремя перегородками, рабочим столом и полкой

На рис.10 показаны данные о скорости выделения тепла при горении автомобилей, измеренной исследователем Жуайо (Joyeux, 1997 [41]). Жуайо показал, что автомобили, произведенные в 1990-х гг., имели более высокие скорости выделения тепла по сравнению с произведенными ранее автомобилями, что может быть связано с

увеличившимся применением полимеров и других неметаллических материалов. Из-за более высокой скорости выделения тепла пожар в автомобиле на автостоянке может вызвать возгорание стоящего рядом автомобиля.

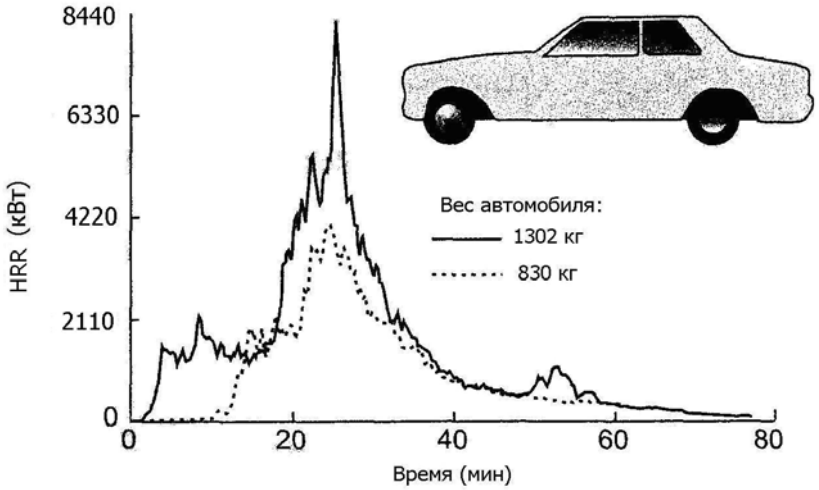


Рис. 10 Автомобили

РЕГУЛИРУЕМЫЕ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ ПОЖАРЫ

Как описано выше, скорость выделения тепла при регулируемом вентиляцией пожаре зависит от объёма воздуха, доступного огню. Кроме того, скорость выделения тепла может быть выражена как функция вентиляционных отверстий помещения, где произошел пожар:

$$Q = 1260\ A_w H_w^{1/2} \qquad \textit{Уравнение 1}$$

где

Q – скорость выделения тепла, кВт
A_w – площадь вентиляционного отверстия, м^2
H_w – высота вентиляционного отверстия, м

Данное уравнение применяется для помещений обычного размера и конструкции с одним прямоугольным проёмом. На рис.11 скорость выделения тепла при регулируемом вентиляцией пожаре представлена как функция ширины двери или другого проёма. На основе уравнения 1 можно получить полезные данные для помещений, выполненных из обычных строительных материалов (гипсокартон, бетон, дерево и т.д.), но оно не подходит для помещений из металла, таких как на корабле со стальными палубами и переборками. В примере 1 показано, как вычислить скорость выделения тепла для регулируемого вентиляцией пожара.

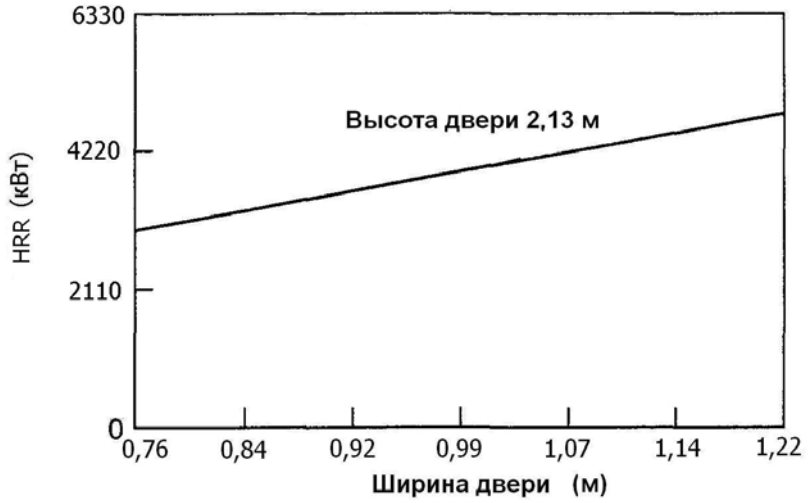


Рис. 11 Скорость выделения тепла (HRR) полностью развившегося пожара в маленьком или среднем помещении обычной конструкции

Пример 1. Регулируемый вентиляцией пожар

В помещении с одним дверным проёмом, которое полностью охвачено пожаром, какова будет мощность этого пожара?

Ширина дверного проёма - 914 мм, высота - 2134 мм.

$$H_w = 2{,}13 \text{ м};\ A_w = 0{,}914 * 2{,}134 = 1{,}9510 \text{ м}^2$$

Поскольку пожар регулируется вентиляцией, применимо уравнение 1:

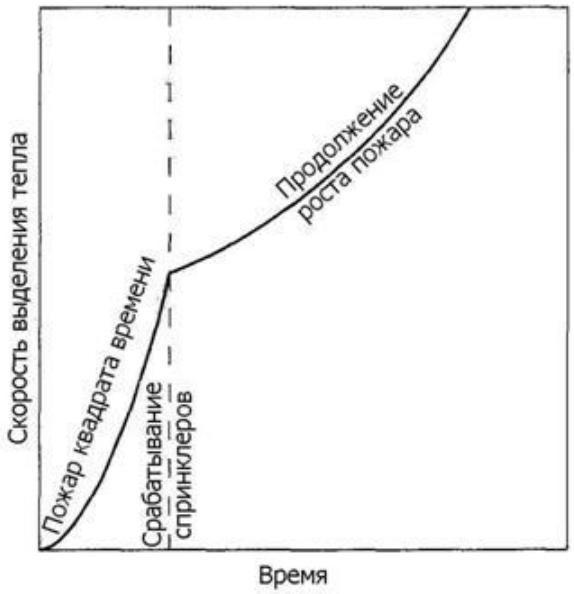
$$Q = 1260\ A_w\ H_w^{1/2} = 1260 * 1{,}9510 * 2{,}13^{1/2} = 3587 \text{ кВт}$$

Для помещений площадью более 30 м^2 адекватность уравнения 1 является сомнительной.

Уравнение 1 было разработано для помещения только с одним проёмом, но в некоторых случаях оно может применяться для помещений с несколькими проёмами. Для ряда прямоугольных проёмов с одним и тем же уровнем верха и низа высота одинакова, а полезная площадь является суммой отдельных зон.

СПРИНКЛЕРЫ

На рис.12 показан рост квадратичного пожара с тремя возможными реакциями на распыление воды спринклерами: огонь превосходит воздействие спринклеров; постоянная скорость выделения тепла; и снижение скорости выделения тепла. Как описано ниже, квадратичный пожар – это пожар, который распространяется с квадратом времени. Огонь может подавить влияние спринклеров в случае очень быстро разрастающегося пожара вследствие горения материалов, которые превышают показатели, заложенные при проектировании спринклеров. Кроме того, спринклеры могут не сработать, если достигающий их дым охлаждается из-за вовлечения воздуха в струю, что может происходить при пожарах в зонах, где потолки относительно высокие по сравнению с расположением топлива. В этом случае, высота пламени обычно меньше высоты потолка, и вовлечение воздуха приводит к охлаждению газов в струе дыма. Если спринклеры сработают, распыляемая вода может испариться до попадания на топливо.



(a) Огонь превосходит воздействие спринклеров

(b) Завышенная оценка постоянной HRR после активации спринклеров

Рис. 12 Взаимодействие пожара и спринклеров

Снижение скорости выделения тепла из-за спринклеров

Постоянная скорость выделения тепла после срабатывания спринклера является завышенным оценочным показателем в большинстве прикладных программ. Затухание пожара после срабатывания спринклеров более реалистично. Затухание пожара может быть выражено следующей формулой:

$$Q = Q_{act}\, e^{-(t - ta)/\tau} \qquad \textbf{\textit{Уравнение 2}}$$

где
Q – скорость выделения тепла после срабатывания спринклеров, кВт
Q_{act} – скорость выделения тепла при срабатывании спринклеров, кВт
t – время от начала возгорания, с
t_a – время срабатывания спринклеров, с
τ – постоянная времени тушения пожара, с

Мадржуковски и Веттори (Madrzykovski and Vettori, 1992 [42]) провели пожарные испытания со спринклерами с плотностью водной струи 0,07 мм/с для наборов горючих материалов, которые могут находиться в офисах. Они определили, что кривая затухания пожара с постоянной времени, равной 435 секундам, имела более высокую скорость выделения тепла по сравнению с большинством пожаров в помещениях со спринклерами (рис.13). Эванс (Evans, 1993 [43]) использовал данные этих испытаний, а также данные о пожарах деревянной поленицы и плотности струи спринклера 0,041 мм/с и 0,066 мм/с из испытаний Таманини (Tamanini, 1976 [44]) и вывел следующее соотношение:

$$\tau = 3/w^{1,85} \qquad \textbf{\textit{Уравнение 3}}$$

где
w – плотность струи, мм/с

Несмотря на то, что уравнение 3 не было проверено экспериментально, оно всё же позволяет скорректировать время затухания для плотностей струй спринклеров за исключением тех, что использовали Мадржуковски и Веттори.

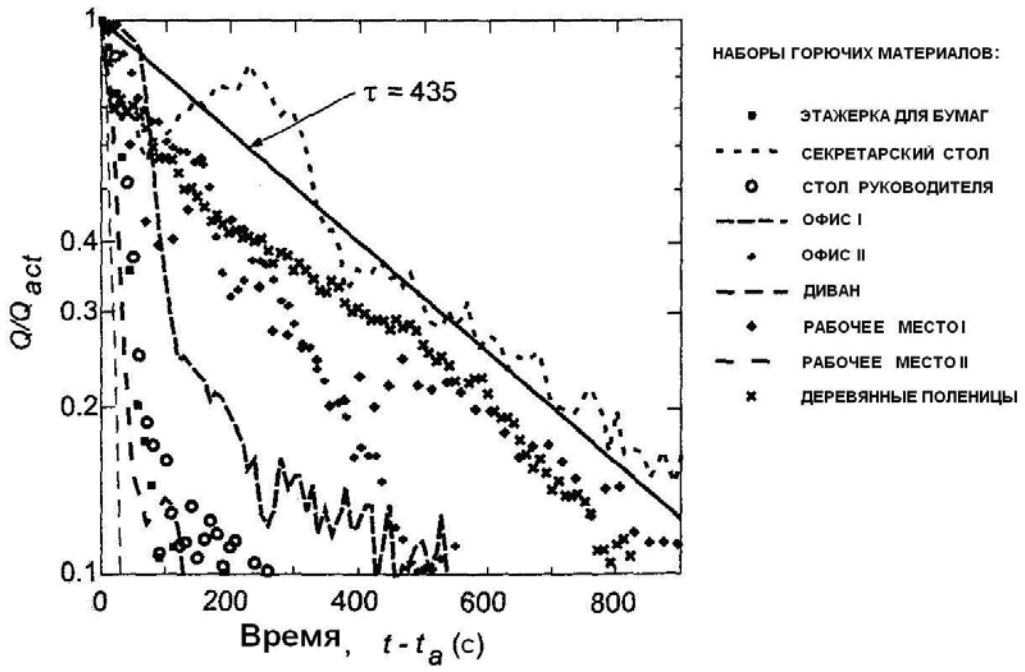


Рис. 13 Затухание пожара при срабатывании спринклеров с плотностью струи 0,07 мм/с

Реакция спринклеров

Несмотря на то, что в данном пункте информация дана в основном о спринклерах, она также применяется к вентиляционным отверстиям, активируемым при помощи плавких защитных элементов и пожарных тепловых извещателей с заданной температурой.

Быстрота реакции спринклеров проверяется испытанием на погружение, в ходе которого спринклер погружается в нагретую печь, где происходит циркуляция нагретого воздуха. Данный расчет основан на допущениях, что: 1) внутреннее сопротивление спринклера является незначительным; 2) спринклер немедленно помещается в печь; 3) коэффициент конвективной теплопередачи является постоянным; 4) температура газа в печи постоянная; и 5) единственная теплопередача - от газа к спринклеру.

Температура спринклера повышается экспоненциально, как показано на рис.14. Постоянная времени, τ, спринклера составляет:

$$\tau = mc/(h_c A)$$ ***Уравнение 4***

где:

τ – постоянная времени, с

m – вес спринклера, кг

c – удельная теплоемкость спринклера, Дж/кг °С

h_c – коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/м^2 °С

A – площадь поверхности спринклера, м^2

Постоянная времени, τ, представляет собой время, за которое температура спринклера достигает 63% от температуры газа. Коэффициент конвективной теплопередачи, h_c, изменяется в зависимости от скорости, вследствие чего постоянная времени также изменяется в зависимости от скорости, на которой она измеряется.

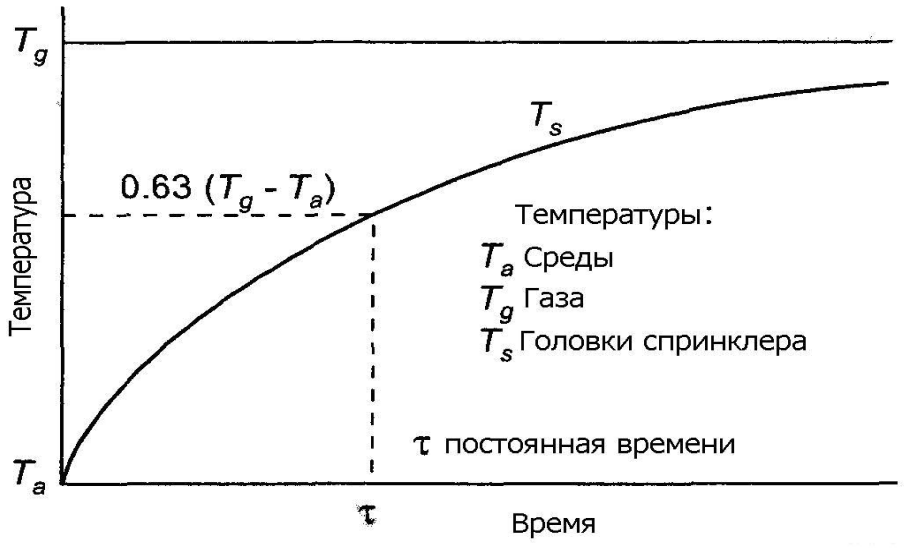


Рис. 14 Температуры в испытании погружением спринклера

Индекс времени срабатывания (RTI) был введен для измерения быстроты реакции спринклеров, независимой от скорости. Он рассчитывается по формуле:

$$RTI = \tau u^{1/2} \qquad \textbf{Уравнение 5}$$

где:

RTI – индекс времени срабатывания, $м^{1/2}$ $с^{1/2}$

u – скорость, м/с

В испытании погружением измеряется время активации спринклера и скорость газа. Затем постоянная времени может быть вычислена на основе времени активации, а индекс времени срабатывания (RTI) может быть вычислен на основе уравнения 5. Индекс времени срабатывания (RTI) для стандартных спринклеров варьируется приблизительно от 77 до 155 $м^{1/2}с^{1/2}$, для быстродействующих спринклеров – приблизительно от 28 до 55 $м^{1/2}$ $с^{1/2}$. Индекс времени срабатывания не учитывает кондуктивную теплопередачу от спринклера.

Активация спринклеров

Активация спринклера зависит от температуры и скорости потока газов вблизи спринклера. При пожаре струи горячих газов распространяются под потолком в радиальном направлении от места столкновения струи дыма с потолком. Для определения времени активации были разработаны специальные компьютерные программы, в которых используются соотношения для таких припотолочных струй.

В программе DETACT-QS используются допущения, что: 1) тепловой датчик расположен на довольно большой площади; 2) только припотолочная струя нагревает датчик; и 3) не происходит нагревания за счет горячих газов, скопившихся в помещении. Требуемые входные данные программы: высота потолка над горючим материалом, расстояние до теплового датчика от оси пламени, температура срабатывания теплового датчика, индекс времени срабатывания (RTI) теплового датчика и скорость выделения тепла при пожаре. Выходные данные программы: температура газов на уровне потолка, температура датчика (оба показателя как функции времени) и время до срабатывания датчика. Программа DETACT-T2 схожа с программой DETACT-QS, за исключением того, что она разработана специально для квадратичных пожаров. Несколько зонных моделей пожара, такие как FAST, LAVENT и JET, способны рассчитывать температуру припотолочной струи и вычислять время срабатывания датчика. Эти компьютерные модели находятся в свободном доступе, и их можно бесплатно заказать в Национальном институте стандартов и технологий (г. Гейтерсберг, штат Мэриленд, США).

РАСЧЕТНЫЕ ПОЖАРЫ

Кривая расчетного пожара – это описание развития пожара, которое может использоваться в сценарии пожара. Кривая представляет собой скорость выделения тепла как функцию времени. Данная кривая может иметь простое значение как константа или может быть простой функцией времени. Кривая расчетного пожара также может являться сложной последовательностью кривых.

В сценарий пожара входит больше, чем просто кривая расчетного пожара. Термин «сценарий» означает намеченный план событий (по аналогии с пьесой или другими театральными постановками). Сценарий пожара может рассматриваться как намеченный план событий и условий, имеющих решающее значение для определения итогов альтернативных расчетов. Кроме скорости выделения тепла и местоположения пожара, сцена-

рий может включать виды используемых горючих материалов, токсические вещества в воздухе, образование сажи и передвижение людей в течение пожара.

Горючие материалы временного хранения

Во многих видах помещений принимаются строгие меры по ограничению пожарной нагрузки с целью ограничения мощности пожара. Такого рода помещения характеризуются внутренней отделкой из металла, кирпича, камня или гипсокартона и, как правило, обставлены предметами из схожих материалов, в том числе, живыми растениями. Даже на такой площади *с ограниченным количеством горючих материалов* может находиться практически неограниченное количество воспламеняющихся предметов, находящихся на кратковременном хранении. Такого рода горючие материалы, не предназначенные для постоянного размещения на данной площади, называются *горючими материалами временного хранения*.

Примерами горючих материалов временного хранения служат рождественские декорации, краска и растворитель, находящиеся в лестничных шахтах в течение ремонта помещений, доставленные и ещё не распакованные пластиковые стаканчики в картонных коробках, разрезанные картонные коробки, приготовленные на выброс, или составленная вплотную мебель, ещё не расставленная по местам после доставки. Иногда горючие материалы временного хранения надолго остаются в одном и том же месте. Например: (1) партия полиуретановых матрацев, доставленных в общежитие и ожидающих распределения в следующем учебном году, (2) автомобили, выставленные на показ в торговом центре, (3) лодки и жилые автоприцепы, выставленные в спортивном комплексе или (4) двухэтажный дом колониального стиля, выстроенный для демонстрации в торговом центре.

При выборе расчетного пожара не стоит забывать о горючих материалах временного хранения. Один из подходов к учету горючих материалов временного хранения в оснащенных спринклерами помещениях с низкими или средними потолками заключается в том, чтобы рассмотреть пожар, происходящий на площади 9,3 $м^2$ со скоростью выделения тепла 225 $кВт/м^2$. Это предполагает допускаемую величину горючих материалов временного хранения в 2110 кВт.

Стационарные пожары

По своей природе пожар протекает неравномерно, однако стационарный (равномерный) пожар является очень удобной идеализацией. Равномерные пожары имеют неизменное значение скорости выделения тепла. Во многих прикладных программах использование модели стационарного пожара приводит к простым расчетам и оценке с запасом.

Скорость выделения тепла на единицу площади

В качестве типового значения скорости выделения тепла для коммерческих зданий Морган (Morgan, 1979 [45]) предлагает значение 500 $кВт/м^2$. Фэнг и Бриз (Fang, Breese, 1980 [46]) определили приблизительно такое же значение для жилых зданий. Морган и Ханселл (Morgan, Hansell, 1987 [47]) и Ло (Law, 1982 [48]) предложили следующее значение скорости выделения тепла на единицу площади для офисных зданий: 225 $кВт/м^2$. Для систем вентиляции и дымоудаления предлагается значение скорости выделения тепла на единицу площади равное 225 $кВт/м^2$ в помещениях с ограничением горючих материалов и 500 $кВт/м^2$ в помещениях с мебелью, древесиной и другими горючими материалами. Пожар на территории площадью 9,3 $м^2$ дает 2110 кВт в зонах с ограниченным количеством горючих материалов и 4642 кВт в зонах, заполненных горючими материалами. Значения скорости выделения тепла на единицу площади, приведенные в таблице 2, помогут определить расчетный пожар.

Таблица 2. Скорость выделения тепла при горении некоторых материалов на единицу площади

	Горючий материал	Скорость выделения тепла на единицу площади, q кВт/м^2
1.	Деревянные поддоны, 0,46 м в высоту (влажность: 6-12%)	1400
2.	Деревянные поддоны, 1,52 м в высоту (влажность: 6-12%)	4000
3.	Деревянные поддоны, 3,05 м в высоту (влажность: 6-12%)	6800
4.	Деревянные поддоны, 4,88 м в высоту (влажность: 6-12%)	10 000
5.	Почтовые сумки, наполненные, 1,52 м в высоту	400
6.	Картонные коробки с ячейками, 4,57 м в высоту	1700
7.	Полиэтиленовые лотки для писем, наполненные, 1,52 м в высоту на тележке	8500
8.	Полиэтиленовые мусорные баки в картонных коробках, 4,57 м в высоту	2000
9.	Душевые кабины из полиэтилена и стекловолокна в картонных коробках, 4,57 м в высоту	1400
10.	Полиэтиленовые бутылки, упакованные в см. пункт 6	6200
11.	Полиэтиленовые бутылки в картонных коробках, 4,57 м в высоту	2000
12.	Полиуретановая изоляционная плита, поропласт, 4,57 м в высоту	1900
13.	Полистироловые сосуды, упакованные в см. пункт 6	14 000
14.	Полистироловые трубки в картонных коробках, 4,27 м в высоту	5400
15.	Полистироловые детали игрушек в картонных коробках, 4,57 м в высоту	2000
16.	Полистироловая изоляционная плита, поропласт, 4,27 м в высоту	3300
17.	Бутылки из ПВХ, упакованные в см. пункт 6	3400
18.	Полипропиленовые трубки, упакованные в см. пункт 6	4400
19.	Полипропиленовая и полиэтиленовая пленка в рулонах, 4,27 м в высоту	6200
20.	Резервуар с метанолом, ∅ 0,16 м	2000
21.	Резервуар с метанолом, ∅ 1,22 м	400
22.	Резервуар с метанолом, ∅ 1,74 м	400
23.	Резервуар с метанолом, ∅ 2,44 м	420
24.	Резервуар с метанолом, ∅ 0,97 м	745
25.	Резервуар с силиконовым трансформаторным маслом, ∅ 1,74 м	90
26.	Резервуар с силиконовым трансформаторным маслом, ∅ 2,44 м	90
27.	Резервуар с углеводородным трансформаторным маслом, ∅ 1,22 м	940
28.	Резервуар с углеводородным трансформаторным маслом, ∅ 1,74 м	900
29.	Резервуар с гептаном, ∅ 1,22	3000
30.	Резервуар с гептаном, ∅ 1,74	3200

В данной таблице приведены округлённые значения. Аналогичную таблицу B.5.2(a) с более точными значениями смотрите в подразделе «Справочная информация» раздела «NFPA 92B. Руководство по системам противодымной защиты атриумов, моллов и больших помещений».

Нестационарные пожары

Нестационарным (неравномерным) пожаром называют пожар, при котором скорость выделения тепла изменяется с течением времени. Часто считается, что на стадии роста пожар усиливается с квадратом времени, и такой пожар принято называть *квадратичным пожаром*. Уравнение квадратичного пожара приведено ниже:

$$Q = a\,t^2 \qquad \textbf{\textit{Уравнение 6}}$$

где:

Q – скорость выделения тепла при пожаре, кВт

a – коэффициент роста пожара, кВт/с^2

t – время от возгорания, с

Рост квадратичного пожара показан на рис.15. В уравнение 6 не включен инкубационный период медленного и неравномерного развития, который часто имеет место перед стадией роста пожара, но общепризнанным остается тот факт, что при проектировании систем дымоудаления учет инкубационного периода не является необходимым.

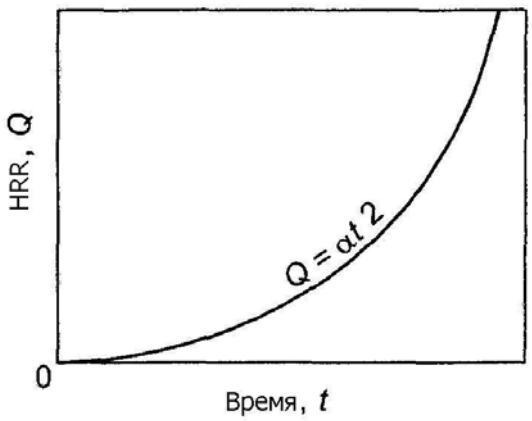


Рис. 15 Кривая роста пожара

В таблице 3 приведены значения роста пожара из стандартов Национальной ассоциации по противопожарной защите (США) NFPA 92B «Руководство по системам противодымной защиты атриумов, торговых центров и больших помещений» [4] и NFPA 72 «Национальные нормы по пожарной сигнализации» [3]. Данные роста пожара, соответствующие значениям из стандарта NFPA 92B, приведены на рис.16. Если не указано иное, то далее по тексту термины «*медленный*», «*средний*», «*быстрый*» и «*сверхбыстрый*», характеризующие рост пожара, относятся к значениям из стандарта NFPA 92B.

Таблица 3. Постоянные роста пожара для квадратичных пожаров

	NFPA 92B		**NFPA 72**
	α (кВт/с^2)	**t_g (с)**	**Диапазон t_g (с)**
Медленный	0,002931	600	$t_g \geq 400$
Средний	0,01127	300	$150 \leq t_g < 400$
Быстрый	0,04689	150	$t_g < 150$
Сверхбыстрый	0,1878	75	–

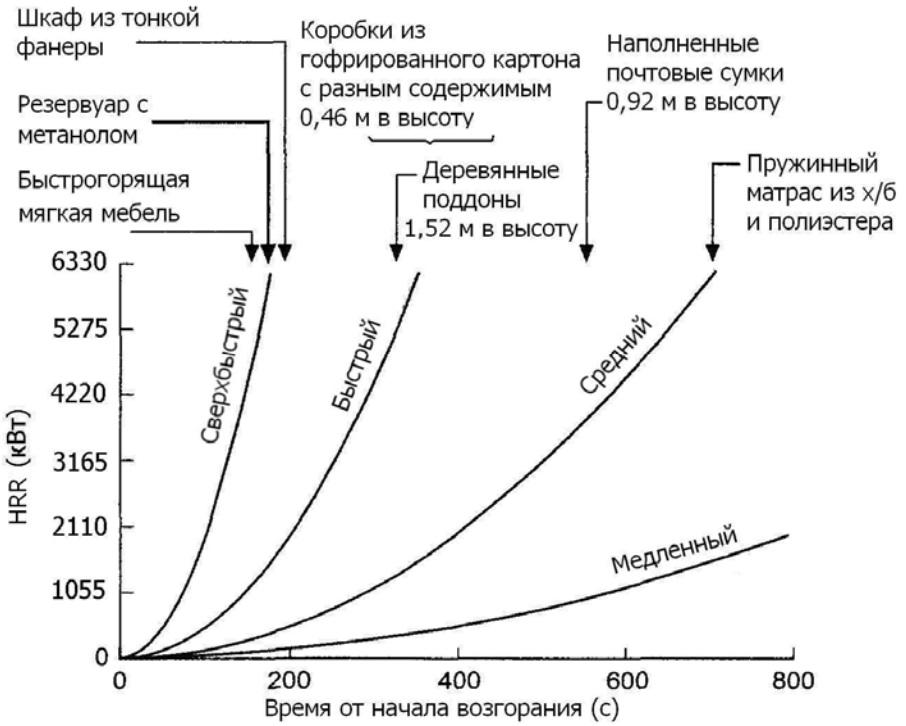


Рис. 16 Соотношение квадратичных пожаров к некоторым пожарным испытаниям

Подход, основанный на наборе горючих материалов

Основной набор горючих материалов представляет собой набор материалов максимально возможных размеров, который может быть охвачен пожаром, используемый в конкретной прикладной программе. Набор горючих материалов может состоять из нескольких горючих элементов (диван, стул, кровать, стол, шторы и т.д.). Ключевое значение в выборе элементов, которые будут составлять основной набор, заключается в том, что поток излучения от одного из горючих элементов приведет к возгоранию остальных элементов, находящихся в основном наборе, не вызвав при этом возгорания посторонних горючих элементов.

Модель точечного источника теплового излучения (рис. 17) рассматривает пламя как небольшой тепловой источник таким образом, что интенсивность теплового излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника. Тепловое излучение также называется *лучистым тепловым потоком*.

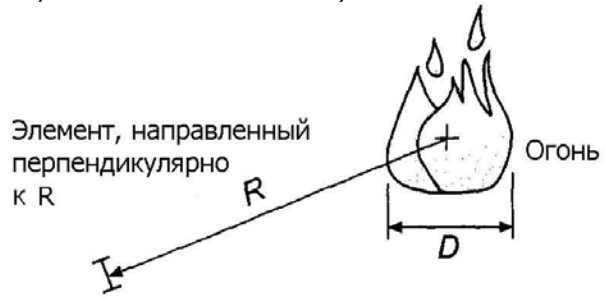


Рис. 17 Модель точечного источника теплового излучения

$$q_r = Q_r / (4\pi R^2)$$ ***Уравнение 7***

где:
q_r – интенсивность теплового излучения, кВт/м^2
Q_r – лучистая теплоотдача, кВт
R – расстояние от центра огня, м

Модель точечного источника излучения действенна при условии, что расстояние от центра пламени превосходит диаметр пожара более, чем в два раза (R > 2D). Интенсивность теплового излучения, q_r, также называют *лучистым потоком*.

Лучистая теплоотдача при пожаре составляет:

$$Q_r = X_r Q$$ ***Уравнение 8***

где
Q – скорость выделения тепла, кВт
X_r – доля теплового излучения

Тепло передается от пламени путем проводимости, конвекции и излучения. Для большинства пожаров теплопередача проводимостью незначительна. Доля теплового излучения может быть выражена следующим уравнением:

$$X_r = 1 - X_c$$ ***Уравнение 9***

где X_c – конвективная доля.

Доля теплового излучения зависит от горючего материала и диаметра пожара, и ее значение варьируется от 0,1 до 0,6. Горючие материалы с низкой степенью сажеобразования, такие как метанол, имеют низкую долю теплового излучения, в то время как материалы с высокой степенью сажеобразования, такие как бензин и полистирол, обладают высокой долей излучения. Однако, в прикладных программах моделирования распространены значения X_r = 0,3 и X_c = 0,7.

Понятие «разделительное расстояние» помогает оценить, какие элементы должны применяться в основном наборе горючих материалов. Согласно модели точечного источника теплового излучения разделительное расстояние равно:

$$R_{SD} = (Q_{r,i} / 4\pi q_{r,i})^{1/2}$$ ***Уравнение 10***

где
R_{SD} – разделительное расстояние от центра огня до объекта, м

$Q_{r,i}$ – интенсивность теплового излучения, необходимая для самопроизвольного возгорания, кВт/м^2
$q_{r,i}$ – лучистый поток, необходимый для самопроизвольного возгорания, кВт/м^2

Элементы горючих материалов, расположенные на меньшем расстоянии от огня, чем R_{SD}, должны загореться, в то время как элементы, расположенные на большем расстоянии, чем R_{SD}, загореться не должны. Лучистый поток, необходимый для самопроизвольного возгорания, варьируется от 10 кВт/м^2 для тонких легковоспламеняемых материалов до 20 кВт/м^2 для толстых материалов.

При пожаре скорость выделения тепла, $Q_{r,i}$, необходимая для воспламенения объекта, находящегося на расстоянии R, равна:

$$Q_{r,i}=4\pi R^2 q_{r,i} \qquad \textbf{\textit{Уравнение 11}}$$

Для лучистой теплопередачи, если значение R меньше удвоенного диаметра пожара, модель точечного источника излучения не может быть использована. Необходимо применять другой метод. В примере 2 показан расчет набора горючих материалов временного хранения и дана оценка воспламенения под воздействием теплового излучения.

Пример 2. Набор горючих материалов временного хранения из восьми диванов

Пожарная нагрузка представлена набором горючих материалов, в который входят 8 диванов с наполнителем из пенополиуретана, после доставки в здание временно хранящихся в большом атриуме. Диваны составлены в ряд на расстоянии 0,305 м друг от друга, как показано на рис.18. Потолок атриума достаточно высокий и, следовательно, успешной ликвидации пожара при помощи спринклерной системы не ожидается. Скорость выделения тепла диванов соответствует показателям, приведенным на рис.7. Максимальная скорость выделения тепла составляет 3102 кВт.

Значение лучистого потока для самопроизвольного возгорания $q_{r,i}$, = 20 кВт/м^2 было выбрано с целью получения результатов с запасом.

Радиус R проходил от центра огня до края соседнего дивана и составлял 0,762 м. Скорость выделения тепла, вызывающая возгорание на расстоянии R, рассчитывается на основе уравнения 11:

$$Q_{r,i}= 4\pi R^2 q_{r,i} = 4\pi\,(0{,}762)^2(20) = 146 \text{ кВт}$$

Таким образом, когда мощность пожара дивана 1 достигнет 146 кВт, должно произойти воспламенение дивана 2. Это завышенная оценка, поскольку используется значение лучистого потока для толстых материалов.

Общая скорость выделения тепла при горении группы из восьми диванов может быть рассчитана численно и графически. Графические вычисления показаны на рис.19. Скорость выделения тепла дивана взята из рис.7, момент возгорания второго дивана изображен на рис.19 (a). Предполагается, что последующие диваны воспламеняются при том же лучистом потоке, переходящем от соседнего дивана, как показано на рис.19 (b). Общая скорость выделения тепла при горении группы диванов складывается из суммы индивидуальных кривых скорости выделения тепла каждого дивана, как показано на рис.19 (c).

Насколько можно судить по рис.19 (c), данный пожар является довольно крупным, но он мог быть еще крупнее, если бы расположенные по соседству материалы тоже загорелись под воздействием лучистого потока от горящих диванов.

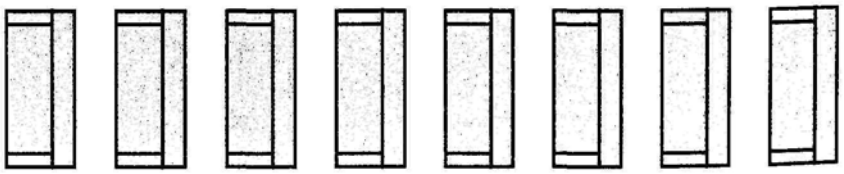
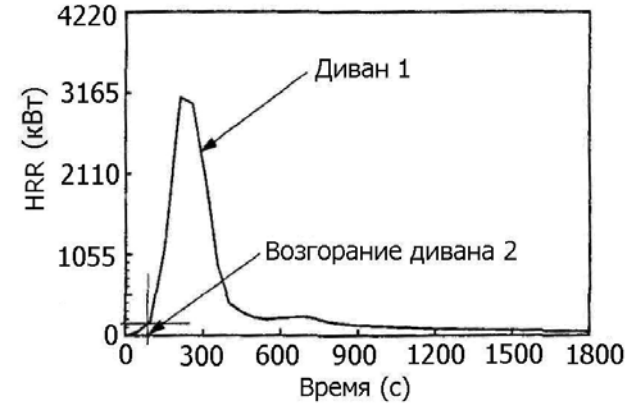
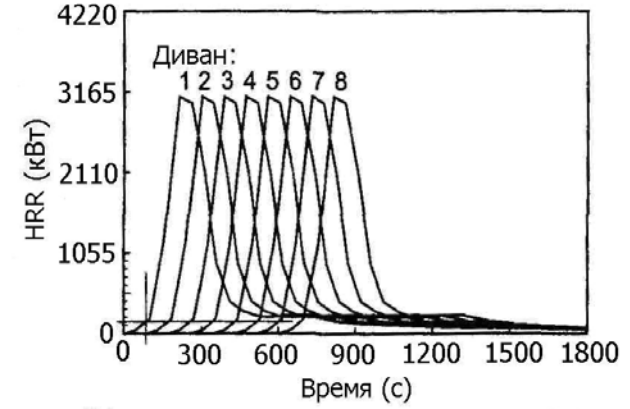


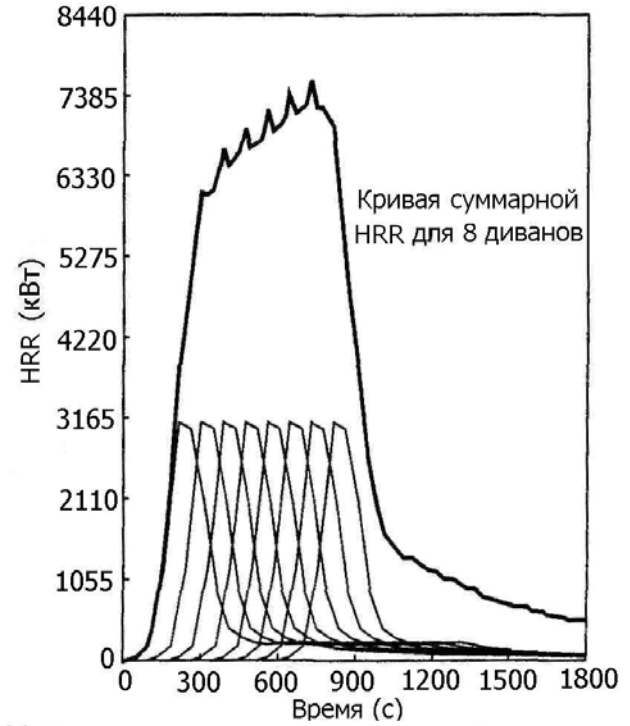
Рис.18 Расположение диванов в атриуме (пример 2)



(a) Постройте кривую для дивана 1 и укажите точку возгорания дивана 2



(b) Постройте кривые для диванов 2-8



(c) Сложите кривые для 8 диванов, чтобы получить кривую суммарной скорости выделения тепла

Рис. 19 Графическое представление для основного набора горючих материалов из примера 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] IBC 2003. «Международные строительные нормы»
IBC 2003. International Building Code

[2] NFPA 5000:2003. «Строительные нормы и правила безопасности при строительстве»
NFPA 5000:2003. Building Construction and Safety Code

[3] NFPA 72:1999. «Национальные нормы по пожарной сигнализации»
NFPA 72:1999. National Fire Alarm Code

[4] NFPA 92B:2000. «Руководство по системам противодымной защиты атриумов, торговых центров и больших помещений»
NFPA 92B:2000. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas

[5] Бученен Э. «Противопожарное проектирование конструкций», 2002 год
Buchanan A. Structural Design for Fire Safety, 2002

[6] Клоут Дж., Милке Дж. «Принципы противодымной защиты», 2002 год
Klote J. and Milke J. Principles of Smoke Management, 2002

[7] Эванс Д., Клоут Дж. «Требования к противодымной защите в Международных строительных нормах 2003 года», 2005 год
Evans D. and Klote J. Smoke control provisions of the 2003 IBC, 2005

[8] Мортон Б.Р., Тейлор Дж., Тернер Дж.С. «Турбулентная гравитационная конвекция постоянного и переменного источников плавучего потока». Публикации Лондонского Королевского Общества 234:1-23, 1956 год
Morton B.R., Taylor G., Turner J.S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proceedings of the Royal Society of London. 234:1-23, 1956

[9] МакКэффри Б.Дж. «Влияние импульса на плавающее диффузионное пламя». Возгорание и пламя. 52 (2); 149-167, 1983 год
McCaffrey B.J. Momentum implications for buoyant diffusion flames. Combustion and Flame. 52 (2); 149-167, 1983

[10] Кетеган Б.М., Зукоски, Э.Э., Кубота Т. «Вовлечение воздуха в струю и геометрия пламени при пожаре». Докторская диссертация Кетегана Б.М., Калифорнийский технологический институт, Пасадена, 1982 год
Cetegan B.M., Zukoski E.E., Kubota T. Entrainment and flame geometry of fire plumes. PhD thesis of Cetegan, Californian Institute of Technology, Pasadena, 1982

[11] Хескестад Г. «Гипотетические источники струй при пожарах». Журнал по пожарной безопасности. 5 (2): 109-114, 1983 год
Heskestad G. Virtual origins of fire plumes. Fire Safety Journal. 5 (2): 109-114, 1983

[12] Хескестад Г. «Инженерные соотношения для дымовых струй при пожарах». Журнал по пожарной безопасности. 7 (1): 25-32, 1984 год
Heskestad G. Engineering relations for fire plumes. Fire Safety Journal 7 (1): 25-32, 1984

[13] Хескестад Г. «Вовлечение воздуха в струю при пожаре согласно двум конкурирующим допущениям». 21-ый международный симпозиум по вопросам горения. Институт горения, Питтсбург, штат Пенсильвания, стр.111-120, 1986 год
Heskestad G. Fire plume air entrainment according to two competing assumptions, Twenty-first Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, pp.111-120, 1986

[14] Хескестад Г. «Дымовые струи при пожаре». Руководство SFPE по противопожарному проектированию. Бостон, штат Массачусетс: Общество инженеров противопожарной защиты, 2002 год
Heskestad G. Fire plumes. SFPE handbook of fire protection engineering. Boston, Mass.: Society of Fire Protection Engineers, 2002

[15] Хескестад Г. «Приток воздуха у отверстий в стенах и потолках, необходимый для предотвращения утечки дыма при пожаре». FMRC J.I. OQ4E4.RU, Норвуд, штат Массачусетс: Научно-исследовательская корпорация «Фэктори Мьючуэл», 1989 год

Heskestad G. Inflow of air required at wall and ceiling apertures to prevent escape of fire smoke. FMRC J.I. OQ4E4.RU Norwood, Mass.: Factory Mutual Research Corporation, 1989

[16] Хескестад Г., Делихтасус М.А. «Среда вокруг пожарных детекторов. Этап I: влияние мощности пожара, высоты потолка и материалов». Том I и II. «Измерения» (NBS-GCR-77-86; NBS-GCR-77-95). Гейтерсберг, штат Мэриленд: Национальное бюро стандартов, 1977 год
Heskestad G., Delichatsious M.A. Environments of fire detectors – Phase I: Effect of fire size, ceiling height and materials. Volumes I & II – Measurements (NBS-GCR-77-86; NBS-GCR-77-95). Gaithersburg, Md.: National Bureau of Standards, 1977

[17] Томас П.Х., Теобальд С.Р. и др. «Исследование потока горячих газов при вентиляции кровли». Тех. статья №7, Борхэмвуд, графство Хартфордшир, Великобритания: научно-исследовательский центр по пожарам, 1963 год
Thomas P.H., Theobald C.R et al. Investigation into the flow of hot gasses in roof venting, Tech. Paper №7, Boreham Woods, Herts, UK: Fire Research Station, 1963.

[18] Ньюман Дж.С. «Принципы обнаружения пожара». Пожарные технологии. 24 (2): 116-127, 1988 год
Newman J.S. Principles of fire detection. Fire Technology. 24 (2): 116-127, 1988

[19] Маурер Ф. У. «Временное отставание, связанное с обнаружением и тушением пожара». Пожарные технологии. 26 (3): 244-265, 1990 год
Mowrer F.W. Lag times associated with fire detection and suppression. Fire Technology 26 (3): 244-265, 1990

[20] Лоуид Дж.Д., Хаджисофоклеус Дж.В. «Исследование эффективности дыма в атриумах». Труды Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха. 103 (2): 1-15, 1997 год
Lougheed G.D., Hadjisophocleous G.V. Investigation of atrium smoke effectiveness. ASHRAE Transactions. 103 (2): 1-15, 1997

[21] Лоуид Дж.Д., Хаджисофоклеус Дж.В. «Опасность задымления при пожаре в помещениях с высокими потолками». Труды Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, 107 (1), 2000 год
Lougheed G.D., Hadjisophocleous G.V. The smoke hazard from a fire in high spaces. ASHRAE Transactions. 107 (1), 2000

[22] Лоуид Дж.Д. и другие. «Исследования крупномасштабной физической модели для системы дымоудаления в атриумах». Труды Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, 105 (1): 676-698, 1999 год
Lougheed G.D. et al. Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system. ASHRAE Transactions. 105 (1): 676-698, 1999

[23] Хаджисофоклеус Дж.В., Лоуид Дж.Д. С. Као. «Численное исследование эффективности систем дымоудаления в атриумах». Труды Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, 105 (1): 699-715, 1999 год
Hadjisophocleous G.V., Lougheed G.D., S.Cao. Numerical study of the effectiveness of atrium smoke exhaust systems. ASHRAE Transactions. 105 (1): 699-715, 1999

[24] Купер Л.Й. и другие. «Расчет безопасного времени эвакуации при пожаре». Национальное бюро стандартов (США), NBSIR 80-2172, 1981 год
Cooper L.Y. et al. Estimating safe available egress time from fires. National Bureau of Standards (US), NBSIR 80-2172, 1981

[25] Муди К. и другие. «Пожар на станции метро Кингз-Кросс, 18 ноября 1987 г. – часть II: масштабная модель испытаний роста пожара». Отчёт о происшествии. Управление по вопросам охраны здоровья, техники безопасности и охраны труда, графство Дербишир, Великобритания, 1988 год
Moodie K. et al. Fire at King's Cross Underground Station, 18th November 1987 – Part II: Scale model fire growth tests, Incident Report, Health and Safety Executive, Derbyshire, U.K., 1988

[26] Квинтьер Дж.Дж., Диллон М. И. «Воссоздание пожара в атриуме с помощью масштабной модели». 2-й Международный симпозиум по масштабному моделированию, 23-27 июня, Университет Кентукки, Лексингтон, штат Кентукки. Стр. 73-86, 1997 год
Quintiere J.G., Dillon M.E. Scale model reconstruction of fire in an atrium. 2nd International Symposium on Scale Modeling, June 23-27, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, pp.73-86, 1997

[27] Квинтьер Дж.Дж., МакКэффри Б.Дж., Кашиваги Т. «Наука и технологии процессов горения», 18:1-19, 1978 год
Quintiere J.G., McCaffrey B.J., Kashiwagi T. Combustion Science & Technology 18:1-19, 1978

[28] Чоу У.К, Ло А.К.У. «Исследования по масштабному моделированию перемещения дыма в атриумах и процесса заполнения атриумов дымом». Журнал по противопожарному проектированию 7(2): 56-64, 1995 год.
Chow W.K., Lo A.C.W. Scale modelling studies on atrium smoke movement and smoke filling process. Journal of Fire Protection Engineering 7(2): 56-64, 1995

[29] Чоу У.К., Сю У.М. «Визуализация движения дыма в масштабных моделях атриумов». Журнал прикладной науки 3(2): 93-111, 1993 год
Chow W.K., Siu W.M. Visualization of smoke movement in scale models of atriums. Journal of Applied Science 3(2): 93-111, 1993

[30] Йий Э.Х. «Исследования растекающихся балконных струй с использованием солёной воды и метода лазерно-индуцированной флуоресценции». Исследовательский отчет по противопожарному проектированию 97/7, Университет Кентербери, Новая Зеландия, 1998 год
Yii E.H. Exploratory salt water experiments of balcony spill plume using laser induced fluorescent technique. Fire Engineering Research Report 98/7, University of Canterbury, New Zealand, 1998

[31] Цудзимото М., Такэноу-чи Т., Уехара С. «Закон масштабирования перемещения дыма в атриуме». 11-ое заседание Американско-японской комиссии по пожарным исследованиям и безопасности. Гейтерсберг, штат Мэриленд, Национальный институт стандартов и технологий, 1990 год
Tsujimoto M., Takenou-chi T., Uehara S. A scaling law of smoke movement in atrium. 11th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety. Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology, 1990

[32] Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха. «Руководство по основам проектирования». Атланта, штат Джорджия, 1989 год
ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1989

[33] Зукоски Э.Э., Кубота Т., Кетеген Б. «Вовлечение воздуха в струю при пожаре». Журнал по пожарной безопасности, 3, с.107-121, 1980/1981 годы
Zukoski E.E., Kubota T., Cetegen B. Entrainment in Fire Plumes. Fire Safety Journal 3, pp.107-121, 1980/1981

[34] Наулер, С.П. «Испытания по исследованию среды в помещении для базисной валидации программ компьютерного моделирования пожаров», NUREG.CR-4681, SAND 86-1296, Национальные лаборатории г. Сандия, март, 1987 год
Nowler S.P. Enclosure Environment Characterization Testing for the Base Line Validation of Computer Fire Simulation Codes, NUREG.CR-4681, SAND 86-1296, Sandia National Laboratories, March 1987

[35] Хагглунд Б., Янсон Р., Нireус К. «Испытания заполнением дымом в помещении 6x6x6 метров», Отчет Шведской национальной исследовательской организации министерства обороны, Швеция, сентябрь, 1985 год
Hagglund B., Jansson R., Nireus K. Smoke Filling Experiments in a 6x6x6 Meter Enclosure, FOA Rapport C20585-06, Forsavrets Forskningsanstalt, Sweden, September 1985

[36] Малхолланд Дж., Ханда Т., Сугава О., Ямамото Х. «Испытания заполнением дымом в помещении», статья 81-HT-8, Американское общество инженеров-механиков, 1981 год
Mullholland G., Handa T., Sugawa O., and Yamamoto H. Smoke Filling in an Enclosure, Paper 81-HT-8, ASME, 1981

[37] Купер Л. Й., Харкелроуд М., Квинтьер Дж., Ринкинен У. «Экспериментальное исследование стратификации верхнего горячего дымового слоя для сценариев пожаров в полномасштабных многокомнатных помещениях», статья 81-HT-9, Американское общество инженеров-механиков, 1981 год
Cooper L.Y., Harkelroad M., Quintiere J., Rinkinen W. An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios, Paper 81-HT-9, ASME, 1981

[38] NFPA 13:1999. «Стандарт по установке спринклерных систем»
NFPA 13:1999. Standard for the Installation of Sprinkler Systems

[39] NFPA 92A:2000. «Рекомендуемые правила для систем дымоудаления»
NFPA 92A:2000. Recommended Practice for Smoke-Control Systems

[40] NFPA 204:1998. «Руководство по противодымной и тепловой вентиляции»
NFPA 204:1998. Guide for Smoke and Heat Venting

[41] Жуайо Д. «Пожары в закрытых автомобильных паркингах: пожарные испытания с автомобилями», INC – 96/294d – DJ/NB, 1997 год
Joyeux D. Natural fires in closed car parks: car fire tests. INC – 96/294d – DJ/NB, 1997

[42] Мадржуковски Д., Веттори Р.Л. «Алгоритм спринклерного пожаротушения для системы оценки пожаров Управления общих служб федерального правительства США». NISTR 4833. Гейтерсберг, штат Мэриленд: Национальный институт стандартов и технологий, 1992 год
Madrzykowski D., Vettori R.L. A sprinkler fire suppression algorithm for the GSA engineering fire assessment system. NISTR 4833. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1992

[43] Эванс Д.Д. «Алгоритм спринклерного пожаротушения для модели HAZARD». NISTR 5254. Гейтерсберг, штат Мэриленд: Национальный институт стандартов и технологий, 1993 год
Evans D.D. Sprinkler fire suppression algorithm for HAZARD. NISTR 5254. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1993

[44] Таманини Ф. «Применение водных распылителей при тушении пожаров поленицы». Наука и технологии процессов горения. 14: 17-23, 1976 год
Tamanini F. The application of water sprays to the extinguishment of crib fires. Combustion Science & Technology, 14: 17-23, 1976

[45] Морган Х.П. «Методы противодымной защиты одного или более магазинов в крытых торговых комплексах: краткое описание проекта». Борхэмвуд, графство Хартфордшир, Великобритания: Ведомство по исследованиям в строительстве, 1979 год
Morgan H.P. Smoke control methods in enclosed shopping complexes of one or more stores: a design summary. Borehamwood, Herts, UK: Building Research Establishment, 1979

[46] Фэнг Дж.Б., Бриз Дж.Н. «Распространение пожара в подвальных помещениях жилых домов». NBSIR 80-2120. Гейтерсберг, штат Мэриленд: Национальное бюро стандартов, 1980 год
Fang J.B., Breese J.N. Fire development in residential basement rooms. NBSIR 80-2120. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1980

[47] Морган Х.П., Ханселл Дж.О. «Здания с атриумами: расчет дымовых потоков в атриумах при проектировании систем дымоудаления». Журнал по пожарной безопасности, 12: 9-35, 1987 год
Morgan H.P., Hansell G.O. Atrium buildings: calculating smoke flows in atria for smoke control design. Fire Safety Journal, 12: 9-35, 1987

[48] Ло М. «Пневматические конструкции: пожароопасность и опасность задымления». Противопожарная защита. 48: 24-28, 1982 год
Law M. Air-supported structures: fire and smoke hazards. Fire Prevention, 48: 24-28, 1982

[49] Ло М. «Комментарий о дымовых струях при пожаре в многоуровневых торговых центрах». Журнал по пожарной безопасности, 10: 197, 1986 год
Law M. A note on smoke plumes from fires in multilevel shopping malls, Fire Safety Journal, 10: 197, 1986

[50] Ханселл Дж.О., Морган Х.П. «Методы проектирования систем дымоудаления в зданиях с атриумами», BRE 258, Борхэмвуд, графство Хартфордшир, Великобритания: Ведомство по исследованиям в строительстве, 1994 год
Hansell G.O., Morgan H.P. Design approaches for smoke control in atrium buildings, BRE 258, Borehamwood, Herts, UK: Building Research Establishment, 1994