



Оценка огнестойкости

Международные нормативные рекомендации по температурным нагрузкам от пожаров в зданиях

Текст ЛЕО РАЗДОЛЬСКИЙ, LR Structural Engineering Inc., Линкольншир, штат Иллинойс, США, профессор Северо-Западного университета, Эванстон, штат Иллинойс, США

Сегодня существуют основные упрощенные методы определения пожарной нагрузки на конструкции: временной эквивалентности и параметрического конструирования. Традиционный способ пожарного конструирования с использованием стандартной кривой температура/время нередко приводит к закладыванию в проект завышенных параметров пожарной безопасности, которые его значительно удорожают. Применение же стандартной кривой температура/время может привести к недооценке теплового воздействия. Естественная параметрическая модель пожара строится на основе подлинных граничных условий, возникающих в охваченном огнем пространстве, с учетом пожарной нагрузки, систем вентиляции, геометрии и термических характеристик помещения. Параметрические кривые строятся на основе моделирования теплового равновесия, предполагающего множество вариантов развития пожаров путем изменения вышеперечисленных параметров. Данные кривые включены в так называемый «Шведский стандарт». Они служат основой параметрических кривых температура/время стандарта Eurocode 1-1-2, поэтому могут применяться при проектировании пожаробезопасных конструкций небольших и средних помещений. В данной статье приводится обзор метода оценки огнестойкости несущих конструкций высотных зданий, обусловленного потребностями практической деятельности.

В реальном пожаре выделяются три стадии (рис. 1). Первая, предшествующая воспламенению, или фаза возгорания (А). Она характерна тем, что воспламеняются горючие материалы, значительно изменяется температура в помещении, пламя постепенно распространяется. При этом средняя температура в очаге воспламенения растет, и при 300 – 500°C верхний слой внезапно загорается и пожар развивается в полной мере. Эта стадия также называется самовоспламенением.

Во второй стадии (В), следующей за воспламенением, температура газовой среды резко возрастает приблизительно с 500°C до пиковых значений, которые нередко превышают 1000°C, и становится практически одинаковой во всем помещении. По окончании данной фазы температурная нагрузка начинает уменьшаться, а температура газовой среды снижается (С – стадия охлаждения). Сила и продолжительность пожара в данных фазах зависят от количества и распределения горючих материалов (пожарной нагрузки), скорости горения, условий вентиляции (наличия сквозняков), геометрии помещения и термических свойств стен.

Расчетные характеристики развития реального пожара в здании, а также сведения о несущих конструкциях проектируемого сооружения, термические свойства конструкционных материалов и коэффициенты теплопередачи различных поверхностей конструкции дают необходимую информа-

цию о динамике изменения температур под воздействием пожара. Помимо механических свойств, параметров нагрузки, а также сил сопротивления и физических моментов, можно определить тепловое напряжение и несущую способность конструкции в условиях пожара.

«Концепция пожарной безопасности в здании» (Natural Fire Safety Concept (NFSC) или «Всеобщая концепция пожарной безопасности» (Global Fire Safety Concept) содержат наиболее правильный и достоверный подход к анализу пожарной безопасности конструкций с учетом активного пожаротушения и данных реальных пожаров. В июне 1994 года 11 европейских партнеров под руководством люксембургской научной организации PROFILARBED-Research начали «Европейское исследование» в рамках «Концепции пожарной безопасности в здании», которые были завершены в июне 1998-го года [1].

Согласно NFSC в расчет берутся: а) характеристики здания, влияющие на развитие пожара: сценарий пожара, пожарная нагрузка, тип помещения и условия вентиляции; б) количественные показатели пожароопасности и влияние мер активного пожаротушения, а также продолжительность пожара; этот анализ пожароопасности основан на вероятностных категориях, выведенных на основе данных о реальных пожарах, произошедших в Европе; в) расчетные значения основных параметров, таких как пожарная нагрузка, определенные аналитическим путем; г) расчетная кривая (температура/время) пожарной строительной нагрузки как функция расчетной нагрузки горючего топлива с учетом пожароопасности и, следовательно, мер по пожаротушению; д) модели общей реакции конструкции в свете значений расчетной кривой нагрева и статической нагрузки при пожаре; е) продолжительность периода огнестойкости; ж) достоверные данные о безопасности конструкции, полученные сравнением параметров реальной и необходимой огнестойкости с учетом продолжительности эвакуации и последствий обрушения.

В «Европейском исследовании» в рамках NFSC [1] проанализированы модели пожаров на основании более сотни натурных пожарных испытаний, что позволило внести их в «Европейский стандарт». Кроме того, данные модели пожаров, используя расчетные показатели пожарной нагрузки, позволяют принимать во внимание положительное воздействие мер активного пожаротушения, таких как безопасные пути эвакуации, надлежащая противоподымная вентиляция, а также надежная и удобная в эксплуатации (обслуживании) спринклерная система. Здесь также учитывается опасность возникновения пожара. Таким образом, так называемая «Всеобщая концепция пожарной безопасности» действительно обеспечивает безопасность людей, гарантируя в то же время необходимую огнестойкость конструкции в реальных условиях пожара в здании.

Вероятность эффекта одномоментного воздействия сильных временных (сейсмических или ветровых) и динамических нагрузок при возникновении пожара ничтожно мала. Поэтому воздействие реального пожара на конструкции следует рассматривать как случайное явление, к которому применимы следующие сочетания случайных нагрузок [2]. «Конструктивно-модельные» методы компьютерного моделирования реальных пожаров практически аналогичны соответствующим методам, применяемым в сейсмостойком проектировании. Эта концепция приспособлена к нормативам пожарной безопасности, притом что эти



Рис. 1. Стадии реального пожара

проблемы требуют особого решения, неприменимого к прочим вредным факторам окружающей среды. Какой же должна быть система несущих конструкций на случай пожара? Ответ на данный вопрос зависит от требуемых рабочих характеристик. Как отмечает Бьюкенен: «...ключевым этапом проектирования пожаробезопасных конструкций является достоверное подтверждение того, что огнестойкость конструкции (или каждого из ее элементов) превышает интенсивность пожара, которому она подвержена. Для этого применяется следующее уравнение, которое должно удовлетворять условию:

Огнестойкость \geq Интенсивность пожара, (1)
где Огнестойкость – способность конструкции противостоять обрушению, распространению огня или другим отрицательным последствиям пожара определенной интенсивности; Интенсивность пожара – степень разрушительного воздействия пожара или сил, температур, которые способны привести к обрушению или другим негативным последствиям, вызываемым пожаром».

Расчетная огнестойкость конструкций зависит от термического воздействия и свойств материалов при повышенных температурах. Чтобы определить температуру газовой среды в помещении, прежде всего следует построить соответствующий график функции в координатах температура/время. Затем можно вычислить повышение температуры

конструктивного элемента здания с применением стандартных методов расчета или с помощью компьютерных программ. Несущая способность строительных конструкций должна определяться с учетом уменьшения прочности материала при высоких температурах.

Термические воздействия представлены величиной теплового потока \dot{q}_{net} (Вт/м²), направленного к поверхности элемента строительной конструкции. На поверхностях, подверженных пожару, величина теплового потока определяется с учетом теплопередачи с помощью конвекции и излучения. Несущая способность определяется с учетом температуры и механических свойств материалов при повышенных температурах.

Стандарт EN 1991-1-2: 2002 [4] содержит три нормальные кривые температура/время:

Стандартная кривая температура/время (или ISO Стандартная кривая) представлена в следующем виде:

$$T(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (2)$$

где t – время в минутах.

Данная кривая не отражает реальное поведение пожара в помещении. Температура все время растет, а фаза охлаждения и действительная пожарная нагрузка на строительные конструкции не учитываются. Вероятностный фактор также не принимается во внимание. Не учитывается реальное развитие пожара во времени, поэтому с помощью данной кривой невозможно достоверно рассчитать температуру строительных конструкций. Однако данный график весьма прост в применении (только одна переменная величина t – время).

2. Для больших углеводородных пожаров:

$$T(t) = 1100(1 - 0,25e^{-0,167t} - 0,204e^{-1,417t} - 0,47e^{-15,833t}) + 20. \quad (3)$$

3. Для тлеющего пожара:

$$T(t) = 154t^{0,25} + 20, \text{ где } 0 < t < 21 \text{ min.}$$

$$T(t) = 345 \log_{10}[8(t - 20) + 1] + 20, \text{ где } t > 21 \text{ min.} \quad (4)$$

В последние десятилетия разработаны современные расчетные модели, описывающие характеристики реального пожара, когда учитываются основные параметры, влияющие на развитие и усиление пожаров. Настоящие пожары в значительной степени зависят от пожарной нагрузки,

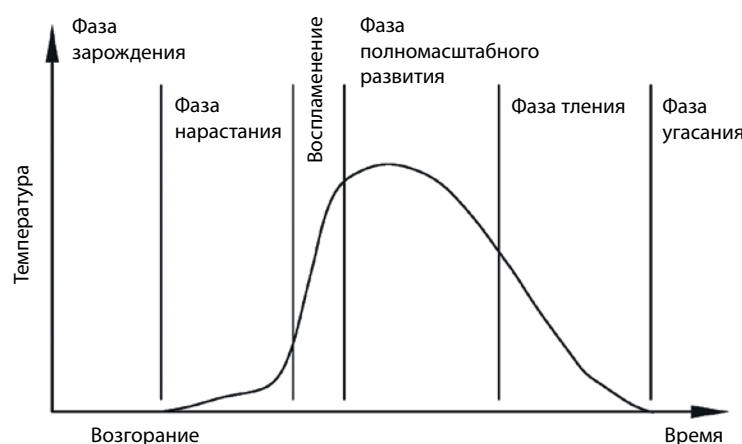
объемов притока воздуха и термических свойств ограждающих конструкций. Температура газовой среды в помещении может быть определена с помощью так называемых параметрических кривых температуры/времени, которые учитывают вентиляционные отверстия в помещении с помощью вводимого фактора размера проемов. Расчетное значение плотности пожарной нагрузки можно вычислить фиксированием наличных условий или использованием характерных значений, приведенных в стандарте EN-1991-1-2, Приложение A [4]. Кроме того, передовые модели пожара принимают во внимание свойства газовой среды, значения обмена энергий и масс указаны в источнике [4], Приложение D.

Важной характеристикой в усовершенствованных моделях пожара является скорость выделения теплоты Q (в ваттах) в объеме помещения (heat release rate (HRR)). Это источник повышения температуры газовой среды, а также движущая сила распространения теплоты и дыма. Теплота горения, или теплосодержание горения, – это энергия, высвобождающаяся при полном сгорании одного моля вещества в обычных условиях. Это, как правило, выражено в химической реакции углеводородного соединения с кислородом, в результате которой получаются углекислота и вода, что сопровождается выделением тепла. При горении у любого вещества имеется своя теплотворная способность, как энергия на единицу масс, которая выражается следующими размерностями: ккал-кг, кДж-кг, Дж-моль, Вт-м³. Обычно значения горения измеряются с помощью калориметрической бомбы. В строительстве применяется множество синтетических конструкционных материалов, в том числе на основе углеводородных соединений, например, полимеры. У подобных материалов энергетический потенциал значительно выше, чем у традиционных, таких как древесина. А углеводородные виды топлива имеют приблизительно вдвое больший энергетический потенциал, чем обычные горючие вещества. Сведения о выделяемой теплоте при сгорании обыкновенных горючих веществ приведены в Таблице 1.

Таблица 1. ТЕПЛОТА ГОРЕНИЯ

Теплота горения некоторых обычных горючих веществ			
Вещество	кДж-гр	ккал-гр	Btu-lb
Водород	141,9	33,9	61000
Бензин	47,0	11,3	20000
Дизтопливо	45,0	10,7	19300
Этанол	29,8	7,1	12000
Пропан	49,9	11,9	21000
Бутан	49,2	11,8	21200

Рис. 2. Зарождение и развитие пожара в помещении



Скорость выделения теплоты в объеме помещения (HRR) вычисляется умножением массовой скорости (масса/время) на теплоту горения (энергия/масса) и коэффициент производительности горения для определения массовой доли топлива, которая превращается в энергию. Пожар, при котором с течением времени усиливается выделение энергии, классифицируется как «растущий пожар». Когда с течением времени HRR приближается вплотную к значению постоянной, считается, что пожар пребывает в «стационарном состоянии». А если со временем HRR уменьшается, следует считать, что пожар находится в «стадии угасания». Массовая скорость горения в помещении, охваченном пожаром, определена К. Кавагоэ [5] (см. ниже формулу 41).

Согласно «Британскому институту стандартов» [6, 7], устройство конструктивных элементов на случай пожара должно выполняться с предельной прочностью. Для многих из стальных и бетонных конструкций высотных зданий это требуемые рабочие характеристики. Левая часть неравенства (1) является результатом конструктивного анализа здания, который основан на расчете предельного состояния (Limit State Design (LSD)). Этот метод включает предел прочности (ultimate limit state design (ULS) и предельную рабочую деформативность (Serviceability Limit State (SLS)). В соответствии с требованиями по пределу прочности конструкция не должна обрушиться под воздействием конструкционной пожарной нагрузки. Предполагается, что система несущих конструкций должна соответствовать критериям предельного состояния, если все разложенные изгибающие моменты, напряжения на сжатие, растяжение и срез, умноженные на коэффициент перегрузки, не превышают несущую способность конструкции для отдельно взятого сечения. Правая часть неравенства (1) описывает интенсивность силы пожара на основании нормативных документов «Совета по пожарной безопасности» (SFPE) 2004 [8], а также метода «Шведских кривых» [9]. Количественные показатели интенсивности силы пожара определяются параметрами кривых температура/время: максимальная температура газовой среды, общая продолжительность реального пожара в помещении, продолжительность периода роста температуры, период угасания, скорость роста температуры в связи с HRR и точкой воспламенения (вторая производная функции температура/время – ноль). Все перечисленные параметры во взаимосвязи являются крайне важными при оценке специфики будущей пожарной нагрузки на конструкции, которая может быть впоследствии использована в качестве исходных данных инженерного анализа несущих строительных конструкций.

Исторически специалисты по пожарной безопасности, а также исследователи процессов горения старались получить все данные параметры путем опытного рассмотрения реальных пожаров

в помещениях и типовых испытаний в печах. Тем не менее, давно считается, что [10]: «Недостаток инженерных данных, полученных в результате испытаний огнестойкости конструкций типовыми методами в печах, вынуждает проводить дополнительные испытания, чтобы можно было применять новые «конструктивно-модельные» методы. Недостатки «старых» типовых данных обусловлены как отсутствием строгой стандартизации измерений, так и неудовлетворительной воспроизводимостью типовых испытаний в печи». Процесс испытания огнестойкости весьма специфичен, поскольку требования к исследовательской аппаратуре и стандартизации испытаний представлены в нормативных документах в обобщенном виде. Горючее, горелки, футеровка печей и их размеры, степень и способы загрузки или никак не оговариваются, или представлены в обобщенном виде. Из-за этого результаты испытаний не могут быть с точностью воспроизведены в разных лабораториях. Поэтому возникают значительные проблемы при конструировании, обусловленные потребностями практической деятельности».

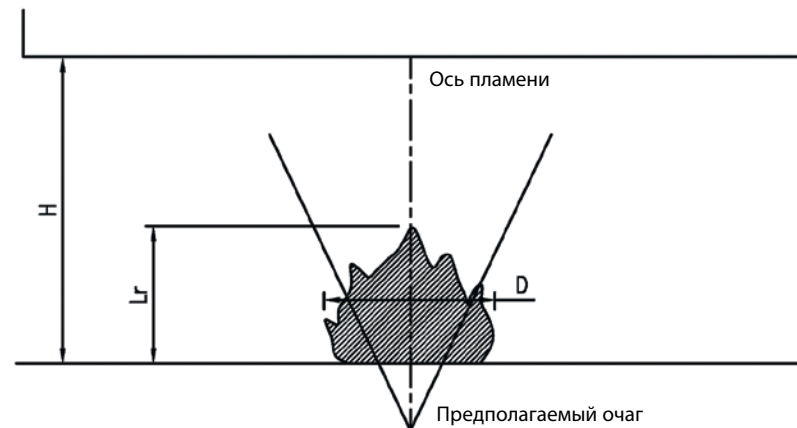


Рис. 3. Принципиальная схема небольших локальных пожаров (H<2Lr)

Подобные же трудности и неопределенности описаны при математическом моделировании реального пожара в помещении, выполненного американским «Национальным институтом стандартов и технологий» NIST [11]: «Для сценариев пожаров, когда скорость высвобождения теплоты является скорее расчетной, а не заданной, неопределенность результатов, полученных при использовании этой модели, резко возрастает. Этому есть ряд причин: 1) свойства различных материалов и реального горючего нередко неизвестны или их определение затруднительно; 2) физические процессы горения, излучения и твердая фаза теплообмена более сложны, чем их математическое выражение в FDS (Пожарная динамическая модель); 3) результаты расчетов зависят как от числовых, так и от физических параметров. Текущее исследование направлено на улучшение положения вещей, однако справедливо признать, что моделирование развития и распространения пожара всегда требует большего умения и инженерной оценки оператора, чем необходимо для моделирования распространения дыма и теплоты от реального пожара».

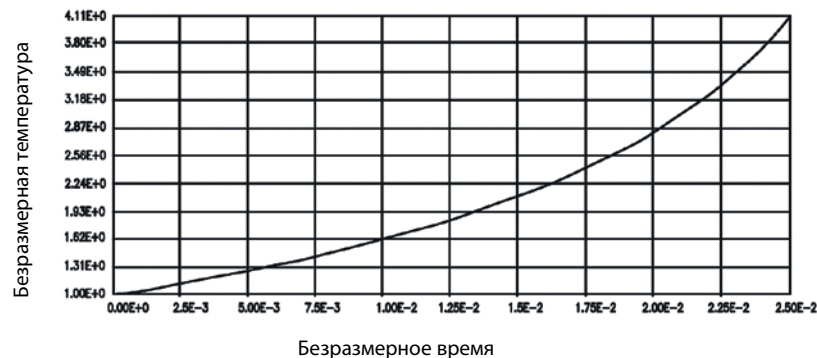


Рис. 4. Безразмерная кривая температура/время

В процессе разработки системы несущих конструкций проектировщики принимают немало решений. Большинство из них принимается под влиянием неопределенности, которой нередко пренебрегают, так как в нашем распоряжении имеются приемы обращения с нею. Неопределенность может быть отнесена к двум общим категориям: случайной и эпистемологической. Первая зависит от удачи и вероятности. Поэтому неопределенности случайного характера несут на себе отпечаток хаотичности. В любом здании, где есть источник возгорания и горючие материалы, может возникнуть пожар по случайным причинам. Факт того, что здание может загореться, – вопрос вероятности, которая имеет количественное выражение. Если вероятность пожара в здании больше нуля, то случайную неопределенность следует принимать за единицу.

Эпистемологический – означает зависимый от человеческих знаний. Таким образом, эпистемологическая неопределенность понимается как величина, которая может быть в теории снижена приобретением большего количества знаний об определенной области. Неопределенности, связанные с пожарной нагрузкой на конструкции, могут проистекать из самых разнообразных источников. Поскольку пожар в здании явление весьма непростое, источники эпистемологических неопределенностей тоже довольно сложны. По сути, прав доктор В. Бабраускас, высказываясь о неопределенностях при измерении температуры пламени [12]: «Даже тщательные лабораторные опыты по воспроизведению реальных пожаров не могут дать достоверных технологий измерения температуры, которые используются специалистами по вопросам горения при проведении фундаментальных исследований. Поэтому надо иметь в виду, что температура пожаров в зданиях может быть неточно оценена, а погрешности в расчетах не очень хорошо определены». Однажды лорд Кельвин произнес: «Это не проблема получить ответы на основании полностью известных исходных данных. Вы попробуйте получить ответы, имея в распоряжении только половину данных. Причем половина из них еще и неверна, и вам неизвестно, которая именно». Хотя речь шла о научном познании, эти слова лорда Кельвина неплохо подытоживают рассуждения о неопределенности применительно к пожарной нагрузке на конструкции.

Чтобы двигаться дальше, нам придется ответить на два главных вопроса: 1. Как можно снизить уровень неопределенности? 2. Каков допустимый уровень неопределенности при определении расчетной пожарной нагрузки на конструкции?

К способам снизить неопределенность относятся:

Разработка и усовершенствование технических оснований для внесения изменений и дополнений в стандарт ASTM E119 с тем, чтобы результаты измерения оказались пригодны для проектирования, обусловленного потребностями практической деятельности.

Использование безразмерных формул энергии, масс, а также уравнений импульсов, которые бы уменьшали количество неизвестных параметров. Применение масштабных коэффициентов при сравнении эффектов нагрева при реальных и стандартных пожарах (подход с использованием временного эквивалента при определении интенсивности пожара).

Выполнение по возможности консервативного аналитического приближения путем машинного моделирования FDS. Эта методика может быть сложной для применения, однако это не уменьшает ее важности. Например, FDS дает представление о временном и пространственном распределении температур в помещении, тем не менее, по практическим соображениям проектирования несущих конструкций следует применять анализ эквивалента равномерности распределенной температуры (таким же образом, как при расчете распределения временной нагрузки [2]).

Проверка комплексного анализа с помощью простых приближительных методик с целью снизить, где это возможно, неопределенность модели и вероятность человеческой ошибки.

Применение инженерной оценки.

Использование эвристических подходов для упрощения математической модели сценариев реального пожара.

Понимание того, что эвристические методы использованы в проекте всюду, где это возможно, с учетом рамок их применения.

Получение неизвестных параметров в безразмерных дифференциальных уравнениях с помощью общей математической «Теории оптимального контроля» [13], когда в распоряжении имеются дополнительные данные о реальных пожарах.

Давайте поясним эти положения на следующем примере.

ПРИМЕР 1

Основные моменты, связанные с возникновением и развитием пожара в помещении, приведены на рис. 2. Закрытый пожар может иметь некоторые или все из перечисленных стадий развития. Давайте для начала разберем отдельно взятую «Фазу нарастания» с учетом случая локализации очага пожара SFPE [8]. В самом начале данной стадии в общем случае пожар не отличается значи-

тельными масштабами и имеет четкую локализацию, поэтому потерями тепла через ограждающие элементы конструкции можно пренебречь (см. рис. 3). Безразмерное дифференциальное уравнение в данном случае выглядит следующим образом:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \delta \left(\exp \frac{\theta}{1 + \beta\theta} \right), \quad (5)$$

где:

$$\delta = \left(\frac{E}{RT_*^2} \right) \left(\frac{h^2}{\lambda} \right) QZ \left(\exp \left(- \frac{E}{RT_*} \right) \right) - \text{параметр}$$

Франка-Каменецкого [14];

$$\beta = \frac{RT_*}{E} - \text{безразмерный параметр};$$

$$\theta = \frac{(T - T_*)E}{RT_*^2} - \text{безразмерная температура [14];}$$

$T_* = 600^\circ\text{K}$ – исходная базовая температура;

$T_0 = 300^\circ\text{K}$ – температура внешней среды;

$$\tau = \frac{a^2}{h} t - \text{безразмерное время};$$

Q = теплота горения (теплота химической реакции);

Z = предэкспоненциальный множитель;

E = энергия активации;

H = высота помещения;

R = универсальная газовая постоянная.

При следующих начальных условиях:

$$\tau = 0; \theta = \theta_0. \quad (6)$$

Давайте примем, что сложный безразмерный параметр δ неизвестен, однако согласно данным полевым пожарным испытаниям, мы располагаем следующей информацией: по истечении периода $t = 45$ мин. ($\tau = 0,025$) максимальная средняя температура в помещении равнялась $T = 723^\circ\text{K}$ (450°C). Если параметр δ задан в уравнении (5), имеется одно и только одно решение для уравнения (5) с начальным условием (6). Если точка на графике решения задана ($t = 45$ мин.; $T = 723^\circ\text{K}$ (450°C)), то остается один и только один неизвестный параметр δ . Такой способ решения называется «от противного» (см. рис. 4). После решения задачи «от противного» с исходным условием (5) параметр $\delta = 20,0$.

Параметр δ рассчитывается по методике [14]:

$$\delta_{cr} = 12,1 (\ln \theta_*)^{0,6}. \quad (7)$$

Если $\beta = 0,1$ (древесное горючее), откуда следует:

$$\theta_* = \frac{600 - 300}{300} (10) = 10,$$

а также

$$\delta_{cr} = 12,1 (\ln 10)^{0,6} = 20. \quad (8)$$

Сходный параметрический анализ для полевого машинного моделирования (например, модель CFD) практически невыполним, и это еще одно доказательство того, что приближительные методики могут быть весьма полезны при определении пожарной нагрузки на несущие конструкции. ■

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. ECSC. ARBED S.A. Natural Fire Safety Concept. Luxembourg, 2001.
2. ASCE 7-05. ASCE Standard. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE. N.Y., 2005.
3. Buchanan, Andrew H. Structural Design for Fire Safety. John Wiley & Sons Ltd., p. 91, 2001.
4. CEN. EN 1991-1-2. Actions on Structures. Part 1-2. Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat. Brussels, 2002.
5. Kawagoe, K., Sekine, T. Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms. Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government, June 1963.
6. BSI. Fire Tests on Building Materials and Structures. BS 476 (Parts 1 to 23). U.K. : British Standards Institution, 1987.
7. BSI. Structural Steelwork for Use in Building. Part 8: Code of Practice for Fire Design. BS 5950-8, U.K. : British Standards Institution, 1990.
8. SFPE. Engineering Guide: Fire Exposures to Structural Elements, Bethesda, Md. : Society of Fire Protection Engineers, 2004.
9. Magnusson, S.E., and Thelandersson S. Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Development: Theoretical Study of Wood Fuel Fires in Enclosed Spaces, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series 65, 1970.
10. NIST GCR 07-910. Fire Resistance Test for Performance-Based Fire Design of Buildings. Final Report, June 2007.
11. NIST. Special Publication 1018-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model.
12. Babrauskas, V. Temperatures in Flames and Fires. Fire Science and Technology Inc., Written 28 April 1997; revised 25 February 2006. Copyright © 1997, 2006.
13. Lawrence, C. Evans, L.C. An Introduction to Mathematical Optimal Control Theory. Version 0.2 Department of Mathematics University of California, Berkeley, CA, 1983.
14. Frank-Kamenetskii, D.A. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics. Plenum Press, New York, 1969.
15. Ingberg, S. H. Tests of the Severity of Building Fires. National Fire Protection Assoc. Quincy, MA, NFPA Quarterly, Vol. 22, No. 1, 43-61, July 1928.
16. Law, M. Review of Formulae for T-Equivalent. Arup Fire, Ove Arup and Partners. London, England International Association for Fire Safety Science. Fire Safety Science. Proceedings. Fifth (5th) International Symposium. March 3-7, 1997, Melbourne, Australia, Intl. Assoc. for Fire Safety Science, Boston, MA, Hasemi, Y., Editor, pp 985-996, 1997.
17. Ingberg, S. H. Fire Resistance Requirements in Building Codes. National Bureau of Standards, Washington, DC National Fire Protection Association Quarterly, Vol. 23, No. 2, p.153-162, October 1929.
18. Pettersson, O., et al. Fire Engineering Design of Steel Structures. Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50, 1976.
19. Magnusson, S.E., and Thelandersson, S. Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Development in Enclosed Spaces, Acta Polytechnica Scandinavia, 1970.
20. Harmathy, T. Z. On the Equivalent Fire Exposure. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario Fire and Materials, Vol. 11, No. 2, p. 95-104, June 1987. CIB W14/87/17 (C); NRCC 28721; IRC Paper 1514.
21. Harmathy, T. Z.; Mehaffey, J. R. Normalized Heat Load: A Key Parameter in Fire Safety Design. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario Fire and Materials, Vol. 6, No. 1, 27-31, March 1982. CIB W14/82/32 (C).
22. EC1. Eurocode 1: Actions on Structures. ENV 1991, Part 1-2: General Actions-Actions on Structures Exposed to Fire, Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
23. SFPE. SFPE Standard on Calculating Fire Exposure to Structural Elements, May 2007.
24. Kawagoe, K., Sekine, T. Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms. Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government, June 1963.
25. Kawagoe, K. Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms, Third Report, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government, October 1967.
26. John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V. Heat transfer textbook, 3rd Edition. Phlogiston Press. Cambridge. MA. USA, 2008.
27. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics. Bookcraft. UK., 1985.
28. Pettersson, O., et al. Fire Engineering Design of Steel Structures, Swedish Institute of Steel Construction. Publication 50, 1976.
29. Babrauskas V., Williamson R. Post-flashover Compartment Fires: Basis of a Theoretical Model. Heydon & Son Ltd., 1978.
30. Lie, T.T. Characteristic Temperature Curves for Various Fire Severities. Fire Technology. Vol 10. No. 4, p.315-326, November 1974.