

Например, полную деформацию рабочей арматуры  $\varepsilon_{s,tot}(\tau)$  изгибаемых элементов конструкций при воздействии пожара предлагается определять из следующего соотношения:

$$\varepsilon_{s,tot}(\tau) = \varepsilon_{s,\sigma}(T) + \varepsilon_{s,\alpha}(\tau) + \varepsilon_{s,c}(\tau), \quad (11)$$

где:  $\varepsilon_{s,\sigma}$  – упругая деформация арматуры;  $\varepsilon_{s,\alpha}$  – температурная деформация арматуры;  $\varepsilon_{s,c}$  – деформация ползучести арматуры, определяемая из кинетического соотношения (10).

На рис.4 приведено сопоставление опытных данных о ползучести стали Ат-У при различных режимах прогрева с результатами расчета этой деформации, полученными двумя способами - с помощью статических соотношений и с помощью кинетических соотношений (10). Рассмотрение полученных данных свидетельствует о том, что:

- при режиме типа "стандартного" пожара как статические так и кинетические соотношения дают близкое совпадение с опытными данными (кривые I, I', I'' рис.4);
- кинетическое соотношение (10) дает хорошее совпадение с опытными данными также и при произвольных режимах прогрева и тем самым позволяет учесть проявления ползучести при переменных скоростях прогрева, характерных для режимов реальных пожаров (см. кривые II и II', III и III', IV и IV' рис.3.11);
- статические зависимости типа приведенных на рис. 3 в силу своей ограниченности условиями стандартного испытания не могут воспроизвести характер развития деформации ползучести при произвольных режимах пожара и, как видно из сравнения кривых III и III'', IV и IV'' рис.4, приводят к недооценке опасности реального пожара, так как опытная, фактическая ползучесть получается намного выше расчетной.

Таким образом, приведенный пример показывает, что кинетические соотношения типа (10) более точно отражают влияние произвольного прогрева на сопротивление материалов конструкций, чем однозначные зависимости типа  $\varepsilon_r(T)$  на рис. 3.

УДК 614.814

**Якимук В.П.**

## ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ЗАДЫМЛЕНИЯ ПРИ РЕАЛЬНОМ ПОЖАРЕ В ВЫСОКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПО НОРМАМ США

### Введение

Большинство людей, ставших жертвами пожаров, погибли не от ожогов, а оттого что задохнулись в дыму. В технике дымоудаления принято определение дыма как смеси продуктов сгорания, включающих газы и частицы твердых тел и жидкостей, с воздухом, проникающим извне [1]. Опасность, возникающая при задымлении зданий, состоит в следующем:

- наличие в продуктах сгорания токсичных газов. Наиболее типичным примером является окись углерода (угарный газ). Кроме того, в зависимости от состава горящих материалов могут присутствовать наркотические (цианистый водород) и раздражающие (кислотные) вещества;
- пониженный уровень кислорода, вызванный процессом горения, который может стать причиной асфиксии;
- высокая температура продуктов сгорания, что опасно как для людей, находящихся в дыму, так и для тех, кто подвергается тепловому облучению от этой среды;

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев А.И., Ройтман В.М. Огнестойкость строительных конструкций (Учебное пособие). – М.: РИО МИСИ, 1979. – 114с., ил.
2. Мурашев В.И. Основные положения расчета и проектирования железобетонных конструкций в условиях кратковременного и длительного воздействия высоких температур. – В кн.: Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1958. – с.176-186.
3. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143с.
4. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 224с., ил.
5. Романенко И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 240.,ил.
6. Pettersson O. Practical Need of Scientific Material Models for Structural Fire Design – General Review.-Fire Safety Journal, 13 (1988), 1-8.
7. Harmathy T.Z. Properties of building materials: bases for fire safety design. – Design of Structures Against Fire, London, 1986. – p. 87-104.
8. Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С., Астапенко В.М., Шевляков А.Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. – М.: Стройиздат, 1988. – 448с.
9. Ройтман В.М. Теория расчета конструкций на огнестойкость. Вчерашние стереотипы или новые подходы? – Пожарное дело, №5, 1989. – с.8-10.
10. Roitman V.M. Consideration of Real Fire Conditions while Calculating the Fire Resistance of Building Structures on the Basis of the Kinetic Approach.-Fire Safety Journal, 16 (1990). – p. 433-442.
11. Roitman V.M., Demekhin V.N., Abdul Majeed M.A. A simplified Prediction Method of Real Fire Exposure as a Basis for Analytical Structural Fire Design. – Fire Safety Science – Proceedings of the Third International Symposium. – Elsevier Applied Science, London and New York, 1991. – p. 751-759.
12. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М: Наука, 1974. – 347с., ил.
13. Бетехтин В.И., Ройтман В.М., Слущер А.И., Кадомцев А.Г. Кинетика разрушения нагруженных материалов при переменной температуре. – Журнал технической физики, 1998, т.68, VI. – с.76-81.

Статья поступила в редакцию 24.01.07

- ухудшение видимости, что затрудняет эвакуацию людей и работу пожарных.

Ухудшение видимости является главной опасностью, которую следует учитывать при проектировании дымоудаления, особенно для обитателей тех помещений, которые не находятся непосредственно в зоне возгорания. В литературе по пожаротушению приведен диапазон допустимых уровней видимости [2]. Для людей, знакомых с планировкой здания и знающих путь к спасению, допустимый уровень видимости составляет 3 - 5 м, а для тех, кто плохо ориентируется, уровень видимости должен быть не менее 25 м.

Воздействие остальных источников опасности (токсичных газов, высокой температуры, пониженного уровня кислорода) существенно для тех людей, которые находятся близко к очагу пожара или в облаке дыма. Развернутое обсуждение вредного воздействия дыма, включая токсичные газы и предельно допустимые уровни для оценки вероятности наступления смертельного исхода или нетрудоспособности, приведено в [3].

Таблица 1. Расчетные параметры для атриумов при устойчивом пожаре

Содержание горючих материалов	Расчетная мощность пожара, кВт
Низкое (минимальное пламя в огнезащищенном атриуме)	2000
Обычное (минимальное пламя при наличии горючих материалов в атриуме)	5000
Высокое (сильный огонь)	25000

### Защита атриумов от задымления

Когда дым от пожара, возникшего в атриуме или в смежном с ним помещении, распространяется в другие помещения здания, возникает угроза для безопасной эвакуации людей. Эта угроза должна в первую очередь приниматься во внимание при проектировании системы дымоудаления. Противопожарные мероприятия должны ограничивать возникновение дыма и его распространение, обеспечивать надежный способ дымоудаления.

Различные подходы, применяемые по отдельности или в сочетании, способны ограничить вредное воздействие дыма на людей, снижая его выделение или изменяя направление его движения, что смягчает вредный эффект. Снижение уровня выделения дыма может быть достигнуто путем установки автоматических спринклерных оросителей и ограничением использования горючих материалов в здании или в конструкции пола атриума.

В дополнение к спринклерной системе используются методы пассивной защиты от задымления, которые сводятся к ограничению распространения дыма. Например, пути пожарной эвакуации могут быть отделены от атриума огнезащитными или дымозащитными ограждениями, что уменьшает опасность для людей при пожаре.

### Инженерные средства дымоудаления

Дымоудаление может осуществляться путем вытяжки дыма из атриума, как с помощью зенитных проемов, так и путем устройства системы вытяжной вентиляции, что позволяет снизить концентрацию дыма в верхней зоне и ограничить его распространение в другие (смежные) помещения. Проектирование системы дымоудаления для атриумов основано на принципе многозональной модели. При пожаре высокотемпературные продукты сгорания образуют восходящую струю. Попутное подмешивание окружающего воздуха к струе увеличивает ее объем и массу. Под потолком помещения формируется стратифицированный слой дыма. По мере накопления дыма толщина слоя увеличивается, его нижняя граница опускается, и, в конце концов, дым может полностью «затопить» атриум. Восходящая дымовая струя, слой дыма под потолком и окружающий более холодный воздух, не вовлеченный в струю, образуют три отдельные зоны в объеме атриума. Инженерный расчет основывается на балансовых уравнениях массообмена и энергообмена между зонами.

На основе экспериментальных данных была разработана система уравнений, позволяющая оценивать свойства дымовой струи, толщину дымового слоя под потолком, усредненные характеристики слоя: температуру, концентрацию газов, оптическую прозрачность. На этих эмпирических зависимостях основывается методика расчета системы дымоудаления, приведенная в руководствах по проектированию [1,4,5].

### Влияние поддува

Задача системы механического дымоудаления состоит в том, чтобы поддерживать нижнюю границу дымового слоя выше некоторого заданного уровня - выше путей эвакуации или самых верхних коммуникационных проемов с соседними помещениями. Для атриумов, когда пространство между потолком и допустимой нижней границей дымового слоя минимально, поддув воздуха в верхнюю зону может повлиять на эффективность механической системы дымоудаления.

Наиболее распространенный подход к проектированию системы дымоудаления для атриумов основан на статической модели пожара (табл. 1), т. е. тепло- и дымовыделения от пожара считаются постоянными. Предполагается, что система дымоудаления, эффективная при расчетных условиях устойчивого пожара, окажется эффективной и в период, когда разгорается огонь. Статическая модель пожара описывается несложными алгебраическими уравнениями, с помощью которых легко определить параметры потока дыма, включая массовый расход в восходящей струе и соответствующую производительность системы дымоудаления, требуемую для обеспечения заданного минимального уровня задымления верхней зоны.

Явление поддува заключается в том, что чистый воздух из-под дымового слоя вовлекается в зону всасывания вытяжного вентилятора. При этом уменьшается эффективность дымоудаления и может возникнуть скопление дыма на периферии верхней зоны, в местах пребывания людей.

В недавно завершеном проекте, финансируемом ASHRAE (RP-899) для изучения указанного явления, Национальный Комитет по научным исследованиям (США) использовал метод физического моделирования в сочетании с CFD-моделью [6, 7, 8]. При этом были разработаны критерии для определения допустимой величины слоя дыма под вытяжными отверстиями и расстояния между отверстиями [9].

Для уменьшения эффекта поддува рекомендуется использовать систему механического дымоудаления несколькими вытяжными отверстиями. При этом максимальный массовый (объемный) расход удаляемого через отверстия воздуха лимитируется заданной глубиной слоя дыма в верхней зоне. Один из возможных способов определения расхода через вытяжные отверстия используется в Великобритании для систем дымоудаления с естественным побуждением [11]. Расчетный массовый расход в вытяжном отверстии определяется по формуле:

$$m_{\max} = C\beta d^{\frac{5}{2}} \left( \frac{T_S - T_0}{T_S} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{T_0}{T_S} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где:  $m_{\max}$  – максимальный массовый расход в вытяжном отверстии без поддува;  $T_S$  – абсолютная температура в дымовом слое;  $T_0$  – абсолютная температура окружающего воздуха  $\beta$  – коэффициент, характеризующий расположение вытяжных отверстий;  $d$  – глубина слоя дыма под вытяжными отверстиями;  $C$  – константа, равная 3,13.

Согласно ограниченным данным, приведенным в публикации, рекомендуется принимать значение  $\beta = 2,0$  для вытяжных отверстий, расположенных на потолке вблизи стен или на стенах вблизи потолка,  $\beta = 2,8$  для вытяжных отверстий, расположенных на потолке вдали от стен.

### Влияние отражения струи дыма от потолка.

Наряду с эффектом поддува возникает явление отражения струи дыма, «натекающей» на потолок, что также сказывается на эффективности системы механического дымоудаления. Нормативом NFPA 92B (2000) предлагается задавать расчетную глубину слоя дыма под потолком таким образом, чтобы

включать зону распространения отраженной струи. В соответствии с этим рекомендуется принимать минимальную толщину слоя дыма равной 10-20% высоты помещения.

Исследования, проведенные в рамках проекта RP-899, показали, что использование нескольких вытяжных отверстий позволяет свести к минимуму эффект поддува и уменьшить расчетную величину глубины слоя дыма под потолком. Данные, полученные при физическом моделировании и на CFD-модели, показали, что существует минимум глубины указанного слоя дыма. Как следует из полученных данных, минимальное значение глубины дымового слоя составляет примерно 10% высоты атриума.

#### Свойства дыма.

Дым оказывает вредное воздействие на людей во время эвакуации. Как было показано выше, опасность при задымлении возникает в связи с повышенной температурой, выделением токсичных газов, ухудшением видимости. Известны различные методы определения интенсивности дымления, высоты дымового облака, концентрации газов, температуры и оптической плотности (ухудшения видимости). Эти методы включают расчеты по алгебраическим уравнениям, приведенным в справочнике NFPA 92B (2000), физическое и компьютерное моделирование.

Для высоких атриумов объем задымления в значительной мере определяется подсосыванием окружающего воздуха к дымовой струе. В результате дымовой слой, формирующийся под потолком в зоне действия вытяжной системы, оказывается «разбавленным», что снижает его потенциальную опасность.

Отражение дымовой струи от потолка и эффект поддува могут также оказывать влияние на глубину дымового слоя. Однако для высоких атриумов существенным является вопрос – представляет ли опасность проникновение дыма в смежные помещения.

Концентрация газовых составляющих в дымовом слое при пожаре в атриуме может быть определена с использованием алгебраического уравнения, приведенного в NFPA 92B (2000) [1]. Уравнение имеет следующий вид:

$$Y_i = \frac{f_i Q}{(X_\alpha \rho_0 \Delta H_C V)}, \quad (2)$$

где:  $Y_i$  – массовая доля  $i$ -компонента в задымлении;  $f_i$  – коэффициент, учитывающий долю  $i$ -компонента в горючих материалах;  $Q$  – суммарное тепловыделение;  $V$  – объемная производительность вытяжной системы;  $X_\alpha$  – коэффициент полноты сгорания, максимальное значение 1;  $\rho_0$  плотность окружающего воздуха;  $\Delta H_C$  – удельная теплота полного сгорания.

В физической модели, где для имитации пожара использовались пропановые горелки [10], единственным исследуемым продуктом сгорания был углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по задымлению ограничивалось только  $\text{CO}_2$ . Однако этот подход может быть распространен и на другие газовые составляющие продуктов сгорания, например, CO. Результаты проведенных исследований показывают, что для определения концентрации газовых компонентов в продуктах сгорания можно использовать алгебраические уравнения и CFD-модели.

В справочнике NFPA 92B (2000) приводится также алгебраическое уравнение для оценки оптической плотности (видимости) в слое задымления во время работы системы вентиляции:

$$D = \frac{D_m Q}{X_\alpha \Delta H_C V}, \quad (3)$$

где  $D$  – оптическая плотность дыма;

$D_m$  – массовая оптическая плотность.

Так как газовые горелки, использованные в экспериментальных исследованиях [10], почти не выделяют дыма, замеры оптической плотности не проводились. По этой причине не представляется возможным сопоставить расчетные и экспериментальные данные.

Параметр «массовая оптическая плотность» в уравнении (3) зависит от состава горючих материалов, режима горения, условий вентиляции и в зависимости от этих факторов может изменяться в широких пределах [12, 13].

#### Выводы

Основы проектирования систем дымоудаления для атриумов изложены в справочных руководствах [1, 2]. При проектировании систем механического дымоудаления с ограничением глубины дымового слоя под потолком следует учитывать влияние эффектов поддува и отражения дымовой струи для гарантированного предотвращения задымления зон с пребыванием людей. Кроме того, для определения параметров задымленной области (температуры, оптической плотности, концентрации токсичных веществ) можно пользоваться алгебраическими уравнениями, приведенными в NFPA 92B (2000). В высоких атриумах при условии использования высокопроизводительной системы дымоудаления концентрация вредных и видимость в слое задымления верхней зоны останутся в пределах допустимого уровня.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. NFPA 92B. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, Национальная ассоциация пожарной безопасности. Куинси, 2000.
2. Tamura G. T. Smoke Movement and Control in High Rise Buildings. Национальная ассоциация пожарной безопасности. Куинси, 1994.
3. Purser D. Toxicity Assessment of Combustion Products. Справочник SFPE по пожарной безопасности. Национальная ассоциация пожарной безопасности. Куинси, 1995.
4. Klote J. K., Milke J. A. Design of Smoke Management Systems. ASHRAE. Атланта, 1992.
5. Morgan H. P. и др. Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation. BRE 368, Construction Research Communication Ltd. Лондон, 1999.
6. Loughheed G. D., Hadjisophocleus G. V. Исследования эффективности механических систем дымоудаления атриумов. ASHRAE Transactions Volume 103(2): 519-533, 1997.
7. Hadjisophocleus G. V., Loughheed G. D., Cao S. Численный анализ эффективности систем дымоудаления атриумов. ASHRAE Transactions Volume 105(1): 699-715, 1999.
8. Loughheed G. D. и др. Исследование систем дымоудаления атриумов на крупномасштабных физических моделях. ASHRAE Transactions Volume 105(1): 676-698, 1999.
9. Klote J. H. Новые разработки для систем дымоудаления атриумов. ASHRAE Transactions Volume 106(1), 2000.
10. Milke J. Использование моделей в проектировании систем дымоудаления. Fire Protection Engineering, летний выпуск, 2000.
11. Evans D. Уникальный метод проектирования дымоудаления. Fire Protection Engineering, летний выпуск, 2000.
12. Webb W. Системы дымоудаления - работают ли они? Fire Protection Engineering, летний выпуск, 2000.
13. Klote J. H. Обзор систем дымоудаления атриумов. Fire Protection Engineering, летний выпуск, 2000.