

С.В. Пузач¹, С.А. Колодяжный²

(¹Академия ГПС МЧС России, ²Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; e-mail: puzachsv@mail.ru)

ОСОБЕННОСТИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ С АТРИУМАМИ (часть 2)

Проведён анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара в многофункциональных центрах с атриумами. Показано, что необходима разработка уточнённых моделей пожара, учитывающих специфику развития пожара в многофункциональных центрах, например, работу системы дымоудаления в нерасчётном режиме или неустановившуюся скорость выгорания горючих веществ.

Ключевые слова: пожар, атриум, многофункциональный центр, термогазодинамика.

S.V. Puzach, S.A. Kolodyazhny

SOME FEATURES OF FIRE HAZARD OF MULTIFUNCTIONAL CENTERS WITH ATRIUMS (part 2)

The analysis of the current state of mathematical modeling of the thermal and gas dynamics of fire in multifunctional centers with atriums is performed. It is shown that it is necessary to develop refined fire models, taking into account the specifics of fire development in multifunctional centers, for example, the work of smoke removal system in off-design regime or unsteady speed of burning combustible materials.

Key words: fire, atrium, multifunctional center, thermal and gas dynamics.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 18 декабря 2015 г.

Анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара

Смешанная (естественная и вынужденная) конвекция, вызванная горением горючего материала и работой систем противопожарной защиты (дымоудаление, пожаротушение) в помещении, протекает в сложных термогазодинамических условиях при одновременном воздействии большого количества факторов, таких, как турбулентность, неизотермичность, сжимаемость, излучение, протекание химических реакций, наличие трех фаз в газовой среде, продольный и поперечный градиенты давления, вдув-отсос на стенке, шероховатость и кривизна поверхности, переход ламинарного режима течения в турбулентный и работа систем противопожарной защиты.

Прямое численное решение уравнений Навье-Стокса, записанных для мгновенных значений параметров потока газа в нестационарных трехмерных термогазодинамических условиях пожара, в настоящее время не является возможным, несмотря на громадный прогресс в быстродействии ЭВМ.

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных законов сохранения для осредненных по времени параметров газа (уравнения Рейнольдса) в настоящее время выполняется с помощью замыкания системы моделью турбулентности ("моментные" методы).

Известные модели турбулентности k - ε , k - ω , алгебраические, Смагоринского и другие показывают, что каждому конкретному случаю течения соответствует вполне определенный набор констант моделирования в модели. Поэтому математическое моделирование турбулентного теплообмена при пожаре в помещении требует тщательного выбора модели.

Детерминированные модели расчёта теплообмена при пожаре в помещении можно разделить на четыре группы: аналитические; интегральные; зонные; полевые (дифференциальные). Различие моделей заключается в разном уровне детализации физико-математической картины пожара.

Одной из первых и простейших аналитических моделей расчёта термодинамики пожара была зависимость средней температуры пожара от времени, задаваемой в виде таблицы или эмпирической формулы [1].

Различные эмпирические формулы, полученные для конкретных условий пожара, из-за невозможности полного соблюдения теории подобия при пожаре в помещении [2] имеют область применения, ограниченную исходными данными экспериментов, в которых они получены.

До появления первой интегральной модели расчёта динамики опасных факторов пожара (ОФП) [2] аналитические модели позволяли определить величину только одного ОФП – среднеобъёмной температуры. Переход к распределениям температур по объёму помещения, что собственно и необходимо для решения задач пожарной безопасности, например, обеспечения безопасной эвакуации людей, осуществлялся по эмпирическим зависимостям, также имеющим ограниченную область корректного использования.

Аналитические решения для расчёта не только температуры, но и величин других ОФП получены из решения системы дифференциальных уравнений интегральной модели (анализ которых выполнен ниже) при существенном упрощении термогазодинамической картины пожара:

- через открытые проемы помещения выходит наружу смесь продуктов горения и воздуха и нет притока наружного воздуха внутрь помещения;
- коэффициент теплопотерь принимается постоянным;
- удельные коэффициенты образования токсичных газов и удельный коэффициент дымообразования при сгорании 1 кг материала, а также удельная скорость газификации горючего материала постоянны и не зависят от концентрации кислорода;
- высота помещения меньше 6 м .

Условие отсутствия поступления воздуха из окружающей среды даже на начальной стадии развития пожара будет выполняться лишь при небольшой величине ёмкости помещения.

В наиболее простых в математическом описании интегральных моделях [2] искомыми параметрами являются среднеобъемные величины давления, температуры, плотности, массовых концентраций кислорода, токсичных продуктов горения, огнетушащего вещества и оптической плотности дыма.

Схема тепломассообмена приведена на рис. 1.

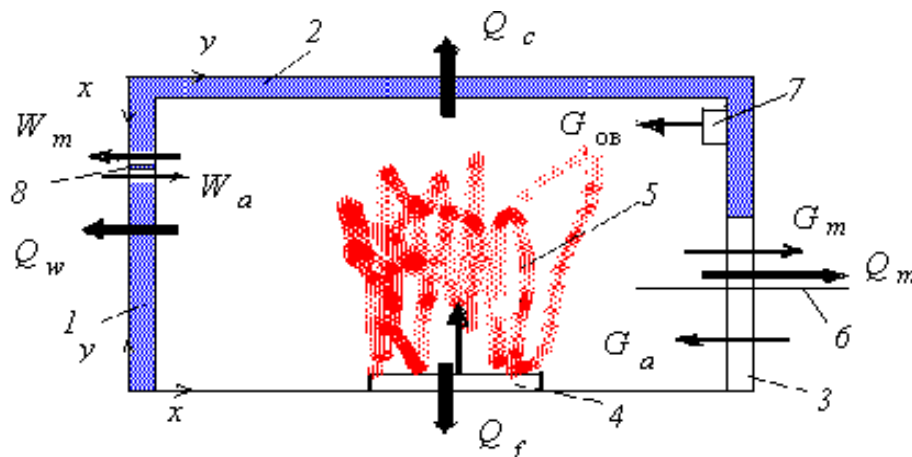


Рис. 1. Схема тепломассообмена в помещении с использованием интегральной модели:
 1 – стены; 2 – перекрытие; 3 – открытый проем; 4 – горючий материал;
 5 – очаг горения; 6 – нейтральная плоскость; 7 – система пожаротушения;
 8 – механическая приточно-вытяжная вентиляция

Интегральная модель представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющих собой нестационарные одномерные (по времени) дифференциальные уравнения законов сохранения массы и энергии для всей газовой среды помещения, оптической плотности дыма, а также массы для отдельных газов. Для замыкания системы уравнений используются дополнительные соотношения (рис. 2).

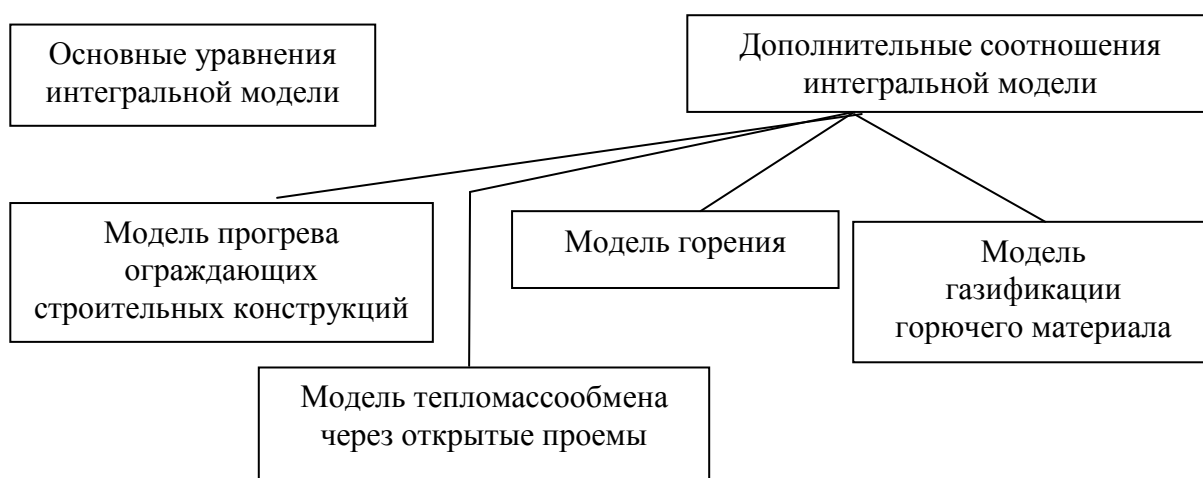


Рис. 2. Структура интегральной модели

Использование интегральных моделей для расчёта динамики ОФП в атриуме некорректно, так как, как правило, его высота больше предельной высоты 6 м [2], выше которой несправедливы эмпирические распределения величин ОФП по высоте (вопрос об их справедливости остается открытым и для помещений с высотой, меньшей 6 м). Поэтому в настоящее время нельзя корректно определить, зная среднеобъемные величины ОФП в атриуме, их локальные значения, например, на уровне рабочих зон галерей атриума.

Область корректного применения интегральной модели (по объемам и геометрии помещений, расположению горючего материала и т.д.) является нерешенной проблемой.

Существенными недостатками интегральных моделей, увеличивающими погрешность результатов расчёта и значительно ограничивающими область их корректного применения, являются:

- описание состояния газовой среды помещения с помощью среднеобъемных величин в период критической продолжительности пожара (эвакуация людей), когда неоднородность основных параметров состояния газовой среды достаточно велика;

- не учитывается геометрическая форма помещения, а также расположение очага пожара относительно ограждающих конструкций, проемов, систем естественной и механической вентиляции;

- теплообмен между газовой средой и ограждающими конструкциями, а также потери излучения через открытые и прозрачные проёмы описывается посредством эмпирических формул, имеющих ограниченную область применения;

- величины ОФП на уровне рабочей зоны помещения не зависят от вида, свойств, места расположения горючего материала и геометрии помещения;

- получение локальных распределений по длине и высоте помещения величин ОФП (что необходимо при решении большинства практических задач, например, обеспечения безопасной эвакуации людей из помещения) требует дополнительных соотношений, полученных из эксперимента или из расчётов по теоретической модели более высокого уровня (зонной или полевой);

- при моделировании массообмена через естественную вентиляцию (оконные и дверные проемы) не учитывается пространственная неоднородность распределения внутреннего давления газовой среды помещения (например, давление уменьшается по мере удаления от конвективной колонки очага пожара);

- не учитывается влияние функционирования системы вытяжной противодымной вентиляции, в частности её время включения и объемный расход, на динамику удельной массовой скорости выгорания жидкости.

В зонных моделях [2], схема одной из которых представлена на рис. 3, помещение разбивается на отдельные зоны. Для определения характеристик теплообмена в этих зонах используются уравнения законов сохранения массы и энергии.

Размеры и количество зон выбираются таким образом, чтобы в пределах каждой из них неоднородности температурных и других полей параметров газовой среды были возможно минимальными, или из каких-то других предположений, определяемых задачами исследований и расположением горючего материала.

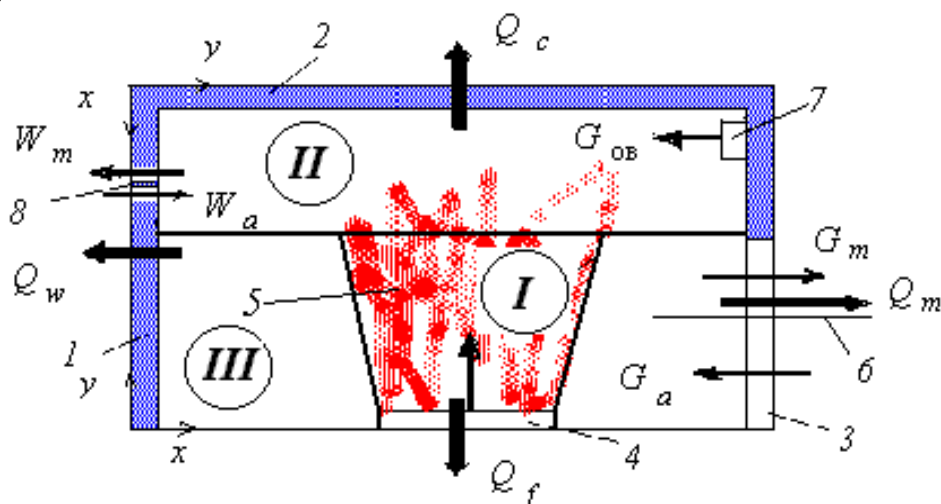


Рис. 3. Схема тепломассообмена в помещении с использованием зонной модели:
 1 – стены; 2 – перекрытие; 3 – открытый проем; 4 – горючий материал;
 5 – очаг горения; 6 – нейтральная плоскость; 7 – система пожаротушения;
 8 – механическая приточно-вытяжная вентиляция; I – зона конвективной колонки;
 II – зона припотолочного слоя; III – зона холодного воздуха

В пределах каждой зоны можно более точно задать теплофизические свойства газовой среды и использовать формулы для расчёта суммарных тепловых потоков, отводимых в ограждающие конструкции, граничащие с данной зоной. Как правило, в этих моделях используются закономерности теплового и гидродинамического взаимодействия струйного течения со строительными конструкциями с условным разбиением на характерные области (критическая точка, область ускоренного течения, переходная область и область автомодельного течения).

Принимаются следующие упрощения термогазодинамики пожара:

- припотолочный слой является плоскопараллельным перекрытию, равномерно прогретым и задымленным в любой момент времени;
- время формирования припотолочного слоя пренебрежимо мало по сравнению с характерными временами эвакуации людей;
- существует условная граница бесконечно малой толщины между зонами припотолочного слоя и холодного воздуха, при переходе через которую термогазодинамические параметры изменяются скачкообразно;
- отсутствует тепломассообмен между припотолочным слоем и зоной холодного воздуха;
- геометрическое положение пожарной нагрузки в помещении не влияет на параметры конвективной колонки, тепломассообмена через открытые проемы с окружающей средой и теплоотвода в ограждающие конструкции.

Уравнения зонной модели получены при следующих основных допущениях:

- присутствие дыма учитывается только в коэффициентах теплотерь из зон конвективной колонки и припотолочного слоя (так как долями тепловой энергии и массы, приходящейся на мелкодисперсные частицы дыма, по сравнению с соответствующими значениями для газовой фазы, можно пренебречь) и в уравнении закона сохранения оптической плотности дыма;

- конвективная колонка является неограниченной свободно-конвективной струей;

- конвективная колонка рассматривается как "квазиодномерная" и стационарная, то есть осредненные по поперечному сечению конвективной колонки термогазодинамические параметры газовой смеси в каждый момент времени изменяются только вдоль её высоты и зависят только от текущих параметров пожара;

- геометрическое положение пожарной нагрузки в помещении не влияет на параметры теплообмена через открытые проёмы с окружающей средой и теплоотвода в ограждающие конструкции;

- газовая смесь состоит из идеальных газов;

- теплофизические свойства смеси газов, такие как, удельная изобарная теплоемкость, газовая постоянная и показатель адиабаты, принимаются равными соответствующим значениям для сухого воздуха.

Структура зонной модели представлена на рис. 4.

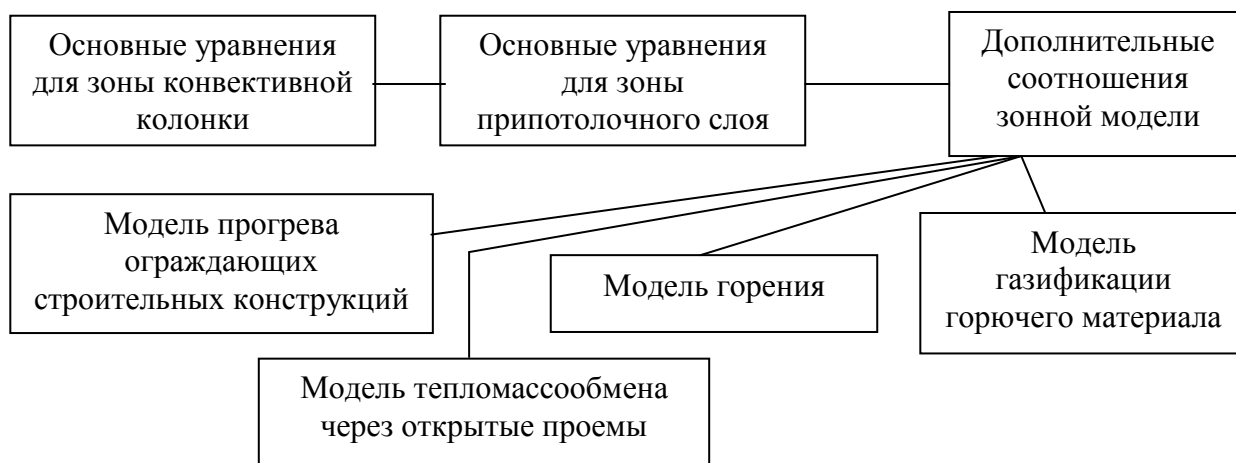


Рис. 4. Структура зонной модели

Использование зонных моделей для расчёта динамики ОФП в атриуме более обоснованно, чем использование интегральных моделей, так как зонные модели более точно отражают реальную термогазодинамическую картину пожара в атриуме, например, существование плоскопараллельного припотолочного газового слоя.

Однако, в работе [3] показано, что припотолочный газовый слой при сложной геометрии перекрытия не является плоскопараллельным и равномерно прогретым и задымленным, а также конвективная колонка не является неограниченной свободно-конвективной струей [4], что противоречит основным допущениям зонного подхода.

Замкнутая система дифференциальных уравнений может быть решена с применением простых численных методов (например, таких, как Рунге-Кутта). Аналитическое решение системы существует только в упрощенном случае [2].

Зонные модели имеют следующие основные недостатки:

- в случае сложной термогазодинамической картины пожара основные допущения зонной модели (равномерно прогретый припотолочный слой и т.д.) не соответствуют реальным условиям;

- выделение конвективной колонки над очагом горения в отдельную зону требует привлечения дополнительной экспериментальной или теоретической информации, так как конвективная колонка при пожаре в помещении не является свободной струей, распространяющейся в неограниченном неподвижном газе;

- в пределах каждой зоны распределение параметров газа вдоль различных направлений, так же как и в интегральных моделях, задается из дополнительных экспериментальных или теоретических соотношений, зависящих от объёмно-планировочных и конструктивных решений помещения (в первую очередь, от его геометрии).

Наиболее подробное описание процессов теплообмена при пожаре дают полевые (дифференциальные) модели [2, 3].

Основное достоинство вышеуказанных моделей заключается в том, что искомыми параметрами в любой момент времени являются поля температур, скоростей, давлений, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма по всему объёму помещения.

Полевые модели наиболее сложны в математическом описании, так как они состоят из системы трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных законов сохранения массы, импульса и энергии. Для замыкания системы уравнений используются дополнительные соотношения для расчёта турбулентного трения, теплообмена и лучистого теплообмена.

При разработке дифференциальных моделей возникает ряд сложных, до конца не решенных проблем теплообмена:

- расчёт турбулентного трения и теплообмена при горении в условиях совместного воздействия ряда возмущающих течение факторов (неизотермичность, сжимаемость, излучение, нестационарность, продольный и поперечный отрицательный и положительный градиенты давления, наличие газовой, твердой и жидкой фаз и т.д.);

- расчёт лучистого теплообмена в оптически неоднородной двухфазной газовой среде в условиях турбулентного горения и его взаимного влияния на конвективный теплообмен;

- расчёт процессов прогрева и газификации пожарной нагрузки под тепловым воздействием пожара.

Полевые модели имеют следующие основные недостатки:

- большая трудоемкость численного решения замкнутой системы дифференциальных уравнений в частных производных;

- большая трудоемкость при разработке программы расчёта и её реализации на ЭВМ;

- из-за ограниченного возможностями современных ЭВМ числа точек конечно-разностной сетки сложно выявить достаточно подробные особенности течения одновременно в пристеночных областях, вблизи дымоудаляющих отверстий и в зоне горения и т.д.;

- несмотря на существенный прогресс в быстродействии ЭВМ, полевые модели требуют больших затрат машинного времени и при проведении ряда вариантных или оптимизационных расчётов неэффективны.

В случае сложной термогазодинамической картины пожара (например, в помещениях большого объёма и высоты) недостаточный объём экспериментальной информации не позволяет обосновать выбор моделей турбулентности и лучистого теплопереноса.

Современные численные методы решения системы уравнений полевой модели разработаны достаточно подробно и апробированы на большом объёме экспериментальных и теоретических исследований, касающихся пожаров в помещениях.

Среди современных программных пакетов расчёта прикладных задач газодинамики и тепломассообмена на ЭВМ при пожаре можно выделить Fire Dynamics Simulator [5], PHOENICS (использованы конечно-разностные процедуры типа SIMPLE) [6], SOFIE (специализированный программный продукт, реализующий трехмерные математические модели для условий пожара) [7], программы [8] и др.

Для специфических сложных термогазодинамических условий пожара требуется тестирование любой из вышеперечисленных программ на экспериментальной или теоретической информации о тепломассообмене в конкретных условиях пожара. Поэтому для пользователей программ появляются дополнительные весьма существенные усилия по его настройке и модернизации. Причем результат может быть и не достигнут из-за невозможности вносить все требуемые изменения непосредственно в исходный текст программы.

Работа с программным кодом требует как больших финансовых возможностей исследователя, так и большой трудоёмкости по освоению, тестированию и настройке программы для решения конкретных задач.

Таким образом, разработка индивидуальных программ для расчёта на ЭВМ тепломассообмена при пожаре является актуальной задачей.

Моделирование работы системы дымоудаления

Одной из важнейших подсистем систем пожарной безопасности, обеспечивающей безопасную эвакуацию людей, является система дымоудаления (СДУ).

При моделировании пожаров учёт работы СДУ выполняется с помощью задания граничных условий на дымоудаляющих отверстиях в математических моделях расчёта термогазодинамики пожара.

СДУ может работать в расчётном режиме, когда удаляется из помещения в основном смесь продуктов горения и воздуха, поступающего в конвективную колонку над очагом горения. Однако при большой разнице между температурами припотолочного слоя и воздуха снаружи помещения (в случае СДУ с естественным побуждением) или при достаточно большой скорости движения газового потока на входе в дымоудаляющее отверстие (при работе вентилятора СДУ) эффективность дымоудаления резко снижается из-за того, что воздух из-под припотолочного дымового слоя, за счёт действия подъемных сил и перепада давлений внутри и снаружи помещения, поступает в дымоудаляющее отверстие и препятствует удалению продуктов горения из помещения. Вышеуказанное явление получило название "plugholing" в зарубежной литературе.

В отечественных литературных источниках начало исследования нерасчётного режима работы СДУ "plugholing" выполнено только в нескольких работах (например, в [9]).

В интегральной и зонной моделях работа СДУ учитывается в граничных условиях, однако моделируется только расчётный режим работы, а режим "plugholing" рассматривается только в одной работе [9] для зонной модели, в случае работы СДУ с искусственным побуждением.

В статье [9] получены формулы для определения начала "plugholing" и коэффициента уменьшения расхода удаляемого дыма, при основном допущении о том, что воронка под дымоудаляющим отверстием имеет симметричную форму. Поэтому необходимо продолжение исследований.

В интегральной и зонной моделях на расчётном режиме расход удаляемой смеси газов и дыма, в случае СДУ с естественным побуждением, определяется по простым полуэмпирическим одномерным соотношениям (например, в [2, 10]), которые имеют следующие основные недостатки, обусловленные неучётом трехмерности течения:

- продольная скорость потока вдоль перекрытия в припотолочном слое перед дымоудаляющим отверстием принимается равной нулю;
- не обоснована величина гидравлического сопротивления дымоудаляющего отверстия и т.д.

В интегральной и зонной моделях расход удаляемой смеси газов и дыма, в случае СДУ с искусственным побуждением, задаётся производительностью вентилятора СДУ или по давлению разрежения, создаваемому вентилятором.

Наиболее точно расход через дымоудаляющее отверстие может быть определен с использованием полевой модели. Однако необходимо достаточно точно и подробно задавать граничные условия на дымоудаляющем отверстии или присоединять дополнительную расчётную область воздуха снаружи помещения. Кроме того, необходим предварительный расчёт по интегральной или зонной модели с целью приближенного выбора параметров СДУ, что позволит резко уменьшить количество трудоёмких расчётов по полевой модели и избежать режима "plugholing".

Выводы

1. На стадии проектирования или при реконструкции многофункциональных центров необходимо моделирование динамики ОФП с целью обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре и эффективной работы систем пожарной безопасности.

2. Существующие допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины пожара во всех типах математических моделей приводят к значительному снижению точности расчёта параметров теплообмена.

3. Необходима разработка уточнённых моделей, учитывающих специфику развития пожара в многофункциональных центрах, например, работу СДУ в нерасчётном режиме или неустановившуюся скорость выгорания горючих веществ.

Литература

1. *Драйздейл Д.* Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1988. 340 с.
2. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
3. *Пузач С.В.* Методы расчёта теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
4. *Пузач С.В., Абакумов Е.С.* Модифицированная зонная модель расчёта термогазодинамики пожара в атриуме // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 2. С. 84-89.
5. *McGrattan, Klein K.B., Hostikka S., Floyd J.* Fire Dynamics Simulator (Version 6) // National Institute of Standards and Technology. Special Publication. 1018. 2013. 149 p.
6. *Spalding D.B.* Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion / 3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines. London: IMochE, 1996. Pp. 25-37.
7. *Welch S., Rubini P.* SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures / User Guide. United Kingdom: Cranfield University. 1996. 340 p.
8. *Пузач С.В.* Интегральные, зонные и полевые методы расчёта динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8 декабря 2006 г.
9. *Пузач С.В., До Т.Т.* Снижение эффективности системы дымоудаления с искусственным побуждением при возникновении "поддува" // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 5. С. 54-61.
10. *Есин В.М.* Введение к каталогу № 3. Вып. № 1. М.: ООО "ВЕЗА", 2003.