

Интеграция математических моделей эвакуации и развития пожара *

К.Ю. ЛИТВИНЦЕВ
ООО "ТОРИНС"
e-mail: sttupick@yandex.ru

А.А. ДЕКТЕРЕВ
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Е.С. КИРИК, А.В. МАЛЫШЕВ, Т.Б. ЮРГЕЛЬЯН
Институт вычислительного моделирования СО РАН

1 марта 2011

В статье рассматривается вопрос об интеграции математических моделей эвакуации людей и развития пожара в рамках единого программного комплекса. Предлагается способ формализации реакции человека на опасные факторы пожара и способ учета влияния людей на развитие ОФП.

Введение

Для адекватного оценивания процесса эвакуации при пожаре в последнее время получил развитие подход, позволяющий рассчитывать и анализировать в едином программном комплексе данные по распространению опасных факторов пожара (ОФП) и эвакуации людей.

Интеграция моделей развития ОФП и эвакуации в едином программном комплексе может быть осуществлена несколькими способами и с различным уровнем учета взаимного влияния процессов эвакуации и распространения ОФП.

В самом простом случае предлагается псевдоинтеграция, когда происходит одновременная визуализация несвязанных друг с другом расчетов процесса эвакуации и распространения ОФП. Данные по эвакуации и ОФП в этом варианте в большинстве случаев просто импортируются в блок визуализации из разных источников. Наложение результатов расчета эвакуации и распространения ОФП (независимо от используемой модели расчета ОФП) при таком подходе может показать, что какой-либо путь заблокирован при наличии на нем людей, в то время как в жизни при наличии дыма люди могли бы воспользоваться другим (незадымленным) путем и избежать попадания в зону действия ОФП.

Второй по сложности способ интеграции (прямая интеграция) состоит в том, что сначала делается расчет развития пожара, затем эти данные импортируются в модуль расчета эвакуации и используются для формирования реакции человека на ОФП при моделировании эвакуации.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП "Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года", ГК №09.0708.11.014, Лаврентьевского гранта для молодых ученых СО РАН 2010 года.

Наиболее сложным вариантом является взаимная интеграция математических моделей расчета эвакуации и распространения ОФП, когда обе модели взаимодействуют друг с другом: учитывается влияние ОФП на движение людей и влияние людей на распространение ОФП соответственно. В таком случае результаты моделирования процесса эвакуации при каком-либо сценарии развития пожара в большей степени соотносятся с возможным реальным развитием ситуации и, как следствие, дают возможность более достоверно оценить опасность объекта с точки зрения угрозы жизни и здоровью людей.

Сосредоточение в едином программной комплексе расчетных модулей по эвакуации и развитию ОФП позволяет по результатам расчетов оценивать количество человек, не подвергшихся влиянию ОФП, подвергшихся влиянию ОФП в концентрациях, совместимых с жизнью, а также возможных трагических исходов. В сочетании с возможностью задавать различные условия эксплуатации объекта, режима работы, времени и места возгорания, такое моделирование становится неоценимым инструментом для анализа уровня пожарной безопасности объектов.

На сегодняшний день программных комплексов, предполагающих интеграцию моделей эвакуации и развития ОФП, в мире насчитываются единицы. Это обусловлено и новизной постановки и сложностью задачи (в первую очередь в вопросе формализации реакции человека на пожар). Но, тем не менее, первые попытки прямой интеграции уже сделаны. В программных комплексах Exodus (Великобритания), FDS+Evac (США и Финляндия), ASERI (Германия) используются данные по полям ОФП и 3D-задымленности, рассчитанные программами SmartFire (Великобритания), FDS (США) и КОBRA-3D (Германия) соответственно, в которых реализована полевая (CFD - computational fluid dynamics) модель развития пожара. В программе Exit 89 [США] используются поля ОФП, рассчитанные программой CFAST(США), в которой реализована зонная модель развития пожара.

Авторами статьи реализована взаимная интеграция математических моделей эвакуации и распространения ОФП в рамках создания программной системы ПБ ЭКСПЕРТ. Для расчета распространения ОФП использован оригинальный программный комплекс SigmaFire [1]. Для расчета эвакуации используется полевая модель SIGMA.DC [2].

1. Влияние эвакуирующихся людей на распространение ОФП

Расчеты распространения ОФП проводились на основе программного комплекса SigmaFire, разработанного коллективом специалистов ИТ СО РАН, СФУ и ООО "ТОРИНС", который предназначен для решения задачи моделирования пожаров.

Программный комплекс SigmaFire основывается на моделировании пространственных нестационарных турбулентных течений. Он содержит программные модули, позволяющие рассчитывать процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей, химические реакции в потоке, горение газообразных, жидких и твердых веществ, конвективный, радиационный теплообмен и процессы теплопроводности, движение дисперсной фазы в потоке газа. Численная методика, заложенная в пакете, основывается на методе контрольного объема для неструктурированных сеток. Используемые многоблочные структурированные неортогональные криволинейные сетки, совмещенные с границей расчетной области, позволяют моделировать процессы в геометрически сложных объектах. В программе используются схемы второго порядка аппроксимации по времени и по пространству. Для аппроксимации конвективных членов используются устойчивые противопоточные схемы второго порядка точности. Связь между полями

скорости и давления реализуется при помощи эффективной SIMPLE-подобной процедуры расщепления.

В рамках создания программной системы ПБ ЭКСПЕРТ на основе программного комплекса SigmaFire был создан модуль 3D-визуального представления модели зданий и анализа результатов расчетов эвакуации и распространения ОФП (рис. 1).

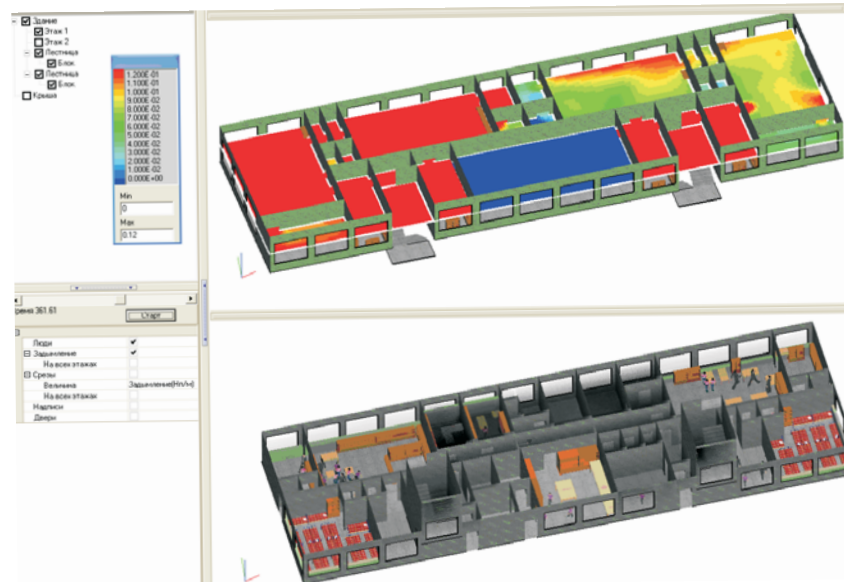


Рис. 1. Модуль 3D визуализации. Верхний рисунок – поле температуры на первом этаже здания; нижний рисунок – эвакуация людей в задымленной области второго этажа.

Перед расчетом распространения ОФП формируется 3D-модель здания, которая включает все значимые конструктивные особенности здания, а также предполагаемое состояние дверей и окон на момент возгорания.

В процессе эвакуации люди могут влиять на протекание пожара, изменяя состояние дверей и окон, используя системы противопожарной защиты. Эти события могут происходить как осознанное действие человека, так и как стихийное.

Осознанное действие происходит, когда человек преднамеренно изменяет структуру здания, например: закрывает дверь для блокировки дыма, открывает запертое окно для эвакуации через него людей или задействует какой-то элемент противопожарной защиты. Осознанные действия могут задаваться посредством предопределения ролей поведения определенным лицам с целью учета в расчете эвакуации.

Стихийное действие имеет место, когда изменение структуры здания человеком происходит в процессе эвакуации естественным образом, например: люди, проходя через дверь с доводчиком, открывают дверной проем, который до этого был закрыт.

С точки зрения полевой модели расчета распространения ОФП происходящие изменения означают, что изменяются граничные условия (разбитые окна, открытые/закрытые внутренние двери и двери наружу и т.п.). То есть модель должна быть адаптирована к наличию динамических граничных условий. Это реализуется следующим образом. Для заданных элементов или областей границ задается список возможных типов границ. Начальный момент определяется как базовое состояние системы. Далее по данным, получаемым из модуля расчета эвакуации полевым методом, происходит определение текущего состояния границ и соотнесение с определенным типом из задан-

ного списка границ. Следующий расчетный шаг выполняется с учетом новых значений граничных условий, так имитируется воздействие людей на протекание пожара.

2. Формализация реакции людей на ОФП

Наибольшей скоростью распространения среди ОФП, как правило, обладает дым. Кроме этого, наличие дыма является важнейшим индикатором опасности, на который реагируют люди. Поэтому именно дым выбран как главный фактор, влияющий на принятие решения человеком о пути эвакуации из здания.

Область распространения дыма условно делят на две зоны [3]. Зоной задымления называют часть пространства, примыкающую к зоне горения и заполненную дымовыми газами в концентрациях, создающих угрозу жизни и здоровью людей или затрудняющих действия пожарных подразделений. Внешними границами зоны задымления считаются места, где плотность частиц дыма составляет $0,0001-0,0006 \text{ кг/м}^3$, видимость предметов 6-12 м, концентрация кислорода в дыме не менее 16 % и токсичность газов не представляет опасности для людей, находящихся без средств противодымной защиты.

Границы допустимых значений по концентрации дыма, для различных групп людей принимаются разными. Так 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.

Большая часть накопленной к настоящему времени информации о реакции человека на пожар носит описательный характер [4, 5]. В то же время при построении математической модели реакции человека на признаки пожара основной задачей является формализация этого явления на языке математики. Охватить при моделировании все многообразие явлений не представляется возможным. Наиболее перспективным видится выделение основных черт этого процесса, к которым относятся: снижение скорости движения человека вследствие снижения видимости (задымления) и влияния токсичных газов; при незначительном задымлении человек может продолжить движение прежним путем к выходу; изменение пути к выходу из здания вследствие обнаружения задымления на текущем пути (в большинстве случаев происходит, если человек знаком с планировкой здания).

Данный список охватывает явления, происходящие в процессе движения во время эвакуации. Действия (поведение) в предэвакуационном периоде на стадии информирования о пожаре и последующем процессе принятия решений пока моделью не охватываются. Предэвакуационный период в модели характеризуется временной задержкой относительно времени возгорания.

Исходя из приведенной информации, строится алгоритм реакции человека на ОФП. Для человека наличие дыма с оптической плотностью $\mu > 0.238$ (соответствующей видимости 10 м и ниже) на расстоянии r^{fire} метров от текущей позиции, является определяющим индикатором наличия пожара в этом направлении. Решение идти в задымленную область, или нет принимается не однозначно, а с определенной вероятностью, которая является обратной функцией от оптической плотности дыма $\mu > 0.238$. На рис. 2 схематично представлен используемая в модели формализация (логическая схема) процесса реакции человека на задымленность текущего пути.

На данном этапе, реализованный алгоритм имеет следующие допущения: проверка на наличие дыма осуществляется лишь в направлении к текущему выходу с этажа;

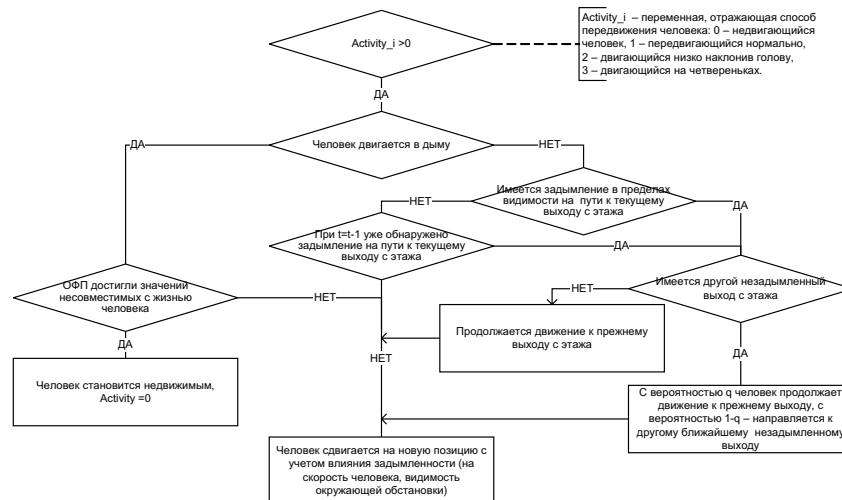


Рис. 2. Логическая схема процесса реакции человека на задымленность.

человек, единожды приняв решение продолжать двигаться по направлению к задымленному пути, не меняет своего решения; задымление на пути эвакуации влияет на величину параметра полевой модели движения людей, радиуса видимости, который определяет расстояние, на котором окружающая обстановка влияет на выбор направления сдвига на следующем расчетном шаге.

Динамику потока в момент смены направления в упрощенном варианте реального процесса можно описать следующим образом. Задымление одновременно могут видеть все люди в потоке, в пределах видимости которых имеется задымление, но решение о смене направления в первую очередь принимается людьми из фронтальной части потока. В этом случае наблюдается эффект инерции, когда фронтальная часть потока пытается сменить направление, тогда как основная часть потока все еще продолжает двигаться в прежнем направлении. Вследствие этого наблюдается определенная задержка в смене направления основной массы людей. Чем плотнее поток, тем более явно выражено это явление. Кроме этого, чем меньше оптическая плотность дыма на пути движения, тем больше людей продолжит движение через дым, не меняя направления.

Данный эффект инерции предлагается моделировать следующим образом: одновременно “увидеть” задымление могут лишь те участники движения, которые находятся на расстоянии не большем $maxr^{fire}$ метров, что приводит к возникновению эффекта инерции. На расчетном шаге люди из фронтальной части потока принимают решение сменить направление (как правило, на противоположное), а люди позади все еще продолжают двигаться в прежнем и не дают сдвинуться фронтальной части в новом направлении. Задается количество шагов, в течение которых может повторяться такое явление в модели (в самом простом случае - 1 шаг). В дальнейшем решение о смене направления людьми из потока не приблизившимися на расстояние $maxr^{fire}$ метров происходит на основании информации, что задымление на данном пути уже было обнаружено на предыдущих расчетных шагах.

Кроме реакции людей на наличие в пределах видимости дыма, важным моментом является учет влияния ОФП на состояние человека. Область возможных значений концентраций ОФП была ранжирована. В соответствии с этим на каждом расчетном шаге определяется, в каком состоянии активности находится человек в зависимости от

значений ОФП: недвижимый, нормальная активность (максимальная скорость), передвигается, низко наклонившись, передвигаются на четвереньках. Скорость движения человека уменьшается с ростом концентраций ОФП согласно данным из [6].

3. Средства интеграции моделей

С момента $t = 0$, момент возгорания, в модуль расчета эвакуации через каждый промежуток времени Δt_1 , [с] передаются значения ОФП в расчетных ячейках в горизонтальных сечениях (на высоте h м от пола) в каждом помещении здания. С момента $t = 0$ в модуль расчета ОФП через интервал Δt_2 , [с] передаются данные по событиям, происходящим по ходу эвакуации людей (изменение состояния внутренних и наружных дверей, состояния окон, выполнение противопожарных мероприятий). Исходя из скорости распространения ОФП, объема передаваемых данных и скоростей движения людей целесообразно осуществлять обмен данными с интервалом в 5-10 секунд.

Заключение

Основная сложность интеграции математических моделей эвакуации и развития ОФП заключается в построении математической модели реакции человека на пожар. На основе анализа большого количества информации был выделен набор характеристик процесса, которые, по мнению авторов, являются наиболее значимыми, определены некоторые количественные показатели и соотношения концентраций ОФП. Предложен способ формализации качественно описанных явлений, реализующий реакцию человека на пожар. Предложен алгоритм динамического изменения граничных условий в полевой модели развития пожара для учета влияния процесса эвакуации на распространение ОФП и способ параллельной интеграции расчетов.

Отметим, что наибольшей интегрируемостью обладают такие модели эвакуации и развития пожара, в которых дискретизация расчетного пространства и дискретизация времени для вычислительных целей являются близкими.

Список литературы

- [1] Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Необъявляющий П.А. Моделирование развития пожаров в здании // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену, Т. 3. Москва, 2010. С. 260.
- [2] Kirik E., Yurgel'yan T., Krouglov D. On realizing the shortest time strategy in a CAFF pedestrian dynamics model // Cybernetics and Systems. 2011. V. 42, №1. P.1-15.
- [3] Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. Москва: Стройиздат, 1987. 228 с.
- [4] Bryan J.L. Behavioral Response to Fire and Smoke // The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Bethesda, MD: Society of Fire Protection Engineers, 2002. P. 3-315-3-340.
- [5] Klote J.H., Milke J.A. Principles of Smoke Management // Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2002.
- [6] Frantzich, H., Nilsson D. Evacuation Experiments in a Smoke Filled Tunnel // Proc. of the Third International Symposium "Human Behaviour in Fire". Belfast, 2004. P. 229-238.