

УДК 614.841:004.021

sergey-subachev@yandex.ru

**РАЗВИТИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ****DEVELOPMENT OF AN INTEGRAL MODEL OF FIRE AND THE PROSPECTS OF ITS
APPLICATION FOR SOLVING PROBLEMS OF FIRE SAFETY**

*Субачев С.В., кандидат технических наук,
Субачева А.А., кандидат педагогических наук
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург
Subachev S.V., Subacheva A.A.,
Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg*

В статье описаны основные результаты многолетней работы над совершенствованием интегральной математической модели пожара, показаны пути её дальнейшего развития и применения в процессе подготовки специалистов пожарной безопасности, для расчета индивидуального пожарного риска и подготовки планов тушения пожаров

Ключевые слова: моделирование пожаров в зданиях, интегральная модель, валидация, расчет пожарного риска

The article describes the main results of years of work on improving the integral mathematical model of fire in buildings and shows the ways for its further development and application in the process of training to specialists of fire safety, for the calculation of individual fire risk and preparing fire-fighting plans

Keywords: modeling of fires in buildings, integral model, validation, calculation of fire risk.

Классическая интегральная математическая модель пожара представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара. Они вытекают из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы и закона сохранения массы [1]. Впервые они были сформулированы профессором Ю.А. Кошмаровым еще в 1976 году, однако метод моделирования стал популярным только при широком распространении персональных компьютеров.

Несколько лет назад, когда мощности персональных компьютеров уже позволяли создавать и использовать различные интерактивные тренажеры и симуляторы, нас заинтересовала проблема разработки компьютерной имитационной системы развития пожара для использования в процессе подготовки специалистов пожарной безопасности, которая позволяла бы в режиме реального времени моделировать развитие пожара в здании при любой введенной пользователем планировке помещений. Основой этой системы, в силу своей относительной простоты и достаточной скорости вычислений, стала интегральная модель пожара.

Однако при анализе различных математических моделей пожара мы пришли к выводу, что существующие модели не всегда позволяют корректно определить площадь пожара: они лишь отражают термодинамические, химические и другие процессы, сопровождающие горение вещества на некоторой уже известной площади. Поэтому при моделировании пожаров в помещениях площадь пожара принимается либо постоянной, либо определяется с помощью вспомогательных моделей распространения пожара по площади. Они, в свою очередь, ограничены «геометрическим» подходом, когда площадь пожара представляется в виде элементарных геометрических фигур – прямоугольника, круга или их частей. Такой подход делает невозможным использование этих моделей для разработки тренажера, так как программа должна вычислять площадь пожара при любой (заранее неизвестной) планировке помещений.

В связи с этим нами была разработана универсальная имитационная модель распространения пожара по площади [2], позволяющая с достаточной для использования в обучающих имитационных системах скоростью моделировать и развитие пожара, и прекращение горения в результате выгорания нагрузки или воздействия огнетушащих веществ (рис. 1).

Синтез этой модели с интегральной моделью пожара позволил перейти на качественно иной уровень моделирования: программа позволяет в реальном и ускоренном режиме времени отображать динамику развития пожара, выводить графики всех опасных факторов пожара в

каждом помещении здания, а также изучать влияние на развитие пожара работы противопожарных систем и действий персонала объекта (включение-выключение в процессе моделирования систем вентиляции, пожаротушения, открытие-закрытие оконных и дверных проемов и т.д.). В таблице 1 показано сравнение разработанной комбинированной модели с программой INTMODEL, реализующей классическую интегральную модель пожара.

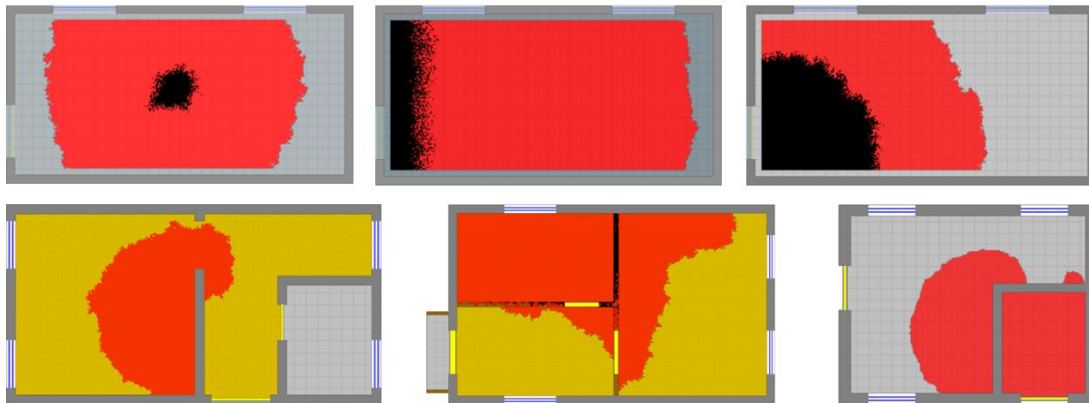


Рис. 1. Моделирование распространения пожара и выгорания горючей нагрузки

Таблица 1. Сравнительная характеристика возможностей разработанной имитационной системы развития пожара и программы INTMODEL

Параметр	INTMODEL	Комбинированная модель
Количество помещений	1	Ограничено только мощностью компьютера (помещения могут отделяться друг от друга горючими и негорючими стенами с любыми пределами огнестойкости)
Форма помещений	Прямоугольная	Произвольные многоугольники
Количество типов горючей нагрузки (одновременно)	1	Не ограничено
Форма площади, занятой горючей нагрузкой	Прямоугольная, в центре помещения	Произвольные многоугольники
Вентиляция	Приточная и (или) вытяжная	Любое количество и время включения (в том числе случайное) приточной и (или) вытяжной вентиляции в каждом помещении
Источники зажигания	1 (в центре площади, занятой горючей нагрузкой)	Любое количество, произвольное место и время возникновения
Распространение горения от источника зажигания	Круговое	Зависит от формы помещения, расположения и характеристик горючей нагрузки
Пожаротушение	Азотом или углекислым газом (один источник и время включения)	Азотом, углекислым газом и (или) водой (из любого количества источников с произвольным временем включения и отключения)
Интерфейс	Операционная система MS-DOS. Табличное и графическое (графики) отображение результатов	Операционная система Windows. Визуальный ввод данных (рисование помещений, задание их характеристик и др.), отображение развития пожара в реальном и ускоренном режиме времени, графики параметров состояния среды в помещениях

Широкие возможности и универсальность разработанной имитационной системы способствовали повсеместному её применению в процессе подготовки специалистов пожарной безопасности:

– на лекционных занятиях – в качестве визуального сопровождения при изучении теоретических вопросов. Это позволяет углубить и расширить объем лекционного материала, акцентировать внимание на наиболее сложных моментах, в наглядной и доступной форме отобразить все процессы развития пожара в их взаимосвязи, что способствует системному пониманию теоретического материала;

– на практических занятиях – в качестве тренажера для отработки навыков принятия самостоятельных организационно-управленческих решений в процессе деловой игры;

– на лабораторных занятиях – для обобщения и систематизации полученных знаний, отработки навыков анализа пожарной опасности зданий и сооружений, выбора оптимальных проектных решений по их противопожарной защите;

– при курсовом и дипломном проектировании – для решения прикладных и проектных задач на основе моделирования и анализа пожарной опасности зданий и сооружений.

Область учебно-практических задач, решаемых с использованием разработанной системы, методика её применения в учебном процессе для различных категорий обучаемых и форм подготовки более подробно показаны в работах [3, 4].

С вступлением в силу Федерального закона 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» для выполнения расчетов пожарного риска возникла необходимость в разработке инструментария, позволяющего прогнозировать развитие пожара в здании и определять время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара. Тогда разработанная комбинированная модель пожара была интегрирована в комплекс программ СИТИС, предназначенный для расчетной оценки индивидуального пожарного риска в зданиях и сооружениях общественного назначения (рис. 2). В настоящее время в системе независимой оценки пожарного риска комплексом программ СИТИС, в том числе программой СИТИС: ВИМ, реализующей разработанную нами комбинированную модель, пользуются более 3000 организаций [5].

При этом в ряде случаев интегральная модель имеет преимущество перед зонными и полевыми моделями, так как позволяет при относительно небольших трудозатратах прогнозировать развитие пожара в зданиях с большим количеством помещений, в том числе производить расчет распространения опасных факторов пожара по вертикали (например, по лестницам), что невозможно выполнить в зонной модели.

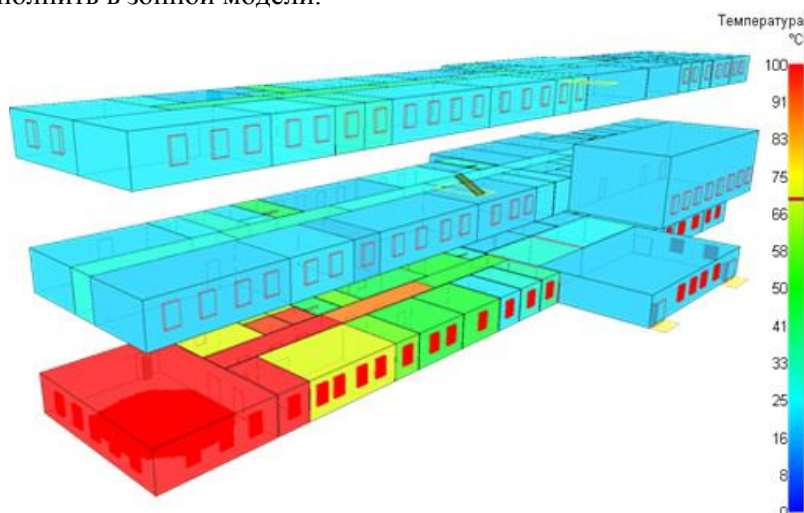


Рис. 2. Моделирование пожара в здании школы в программе СИТИС: ВИМ

Кроме того, для обеспечения приемлемой для оценки риска достоверности результатов моделирования нами проделана большая работа по валидации комбинированной модели пожара. Мы провели сравнение результатов моделирования с данными реальных (натурных) экспериментов, проводимых научно-исследовательскими институтами и лабораториями США, которые приведены в документации по валидации полевой модели FDS (Fire Dynamics Simulator) [6].

При этом были отобраны те эксперименты, которые входят в область определения интегральной модели пожара.

Необходимо отметить, что под термином «валидация» («validation») обычно понимают процесс «определения правильности допущений и основных уравнений метода», процесс определения того, насколько метод расчёта является точным отражением реального мира. Но кроме этого мы, как разработчики модели, включаем в это понятие ещё и процесс корректировки модели с целью построения алгоритмов, позволяющих получить максимально достоверные результаты.

Первую такую корректировку мы произвели после сравнения результатов моделирования с результатами экспериментов под наименованием «NBS_Multi-Room», которые были проведены Национальным бюро стандартов (ныне Национальный институт стандартов и технологий) США. Экспериментальная инсталляция состояла из двух помещений, соединенных между собой коридором, имеющим один выход наружу. Результаты моделирования показали, что методика расчёта теплообмена требует уточнения. По упрощенной методике, предложенной М.П. Башкирцевым [1, с.42] и ранее используемой в интегральной модели, температура стен определялась только исходя из температуры газовой среды (каждой температуре газовой среды соответствует определенная температура стен). Это приводило к быстрой стабилизации параметров моделируемого пожара. Поэтому нами была реализована методика расчёта температуры ограждающих конструкций с учетом их постепенного прогрева. С увеличением температуры стен теплоотдача в них постепенно уменьшается, доля энергии, расходуемой на нагрев воздуха, увеличивается, и его температура возрастает (постепенно, в течение всего времени нагрева конструкций). За основу расчёта конвективного теплообмена была взята методика, описанная в главе 3.4.5 технического руководства двухзонной модели пожара CFAST [7] с учётом отвода тепла в пол, стены и потолок. При этом результаты моделирования качественно стали намного более схожими с экспериментальными данными.

В количественном отношении сходимость результатов стала лучше при увеличении в два раза коэффициента пропускания «виртуальных» проемов (в местах соединения частей, на которые разбивается помещение, если один из линейных размеров превышает два других более чем в пять раз).

В качестве дополнительной проверки правильности моделирования газообмена в дверных и «виртуальных» проемах, а также для валидации алгоритмов расчёта газообмена в горизонтальных проёмах (вертикальный газообмен) мы использовали данные экспериментов «ATF_Corridors», проведённых лабораторией ATF Fire Research Laboratory в 2008 году, которые также приведены в документе [6]. При этом внесенные нами изменения в модель, учитывающие при расчёте газообмена не только разность давлений, но и разность температур (плотностей) воздуха в верхней и нижней зоне, позволили значительно повысить адекватность получаемых результатов. Более подробная информация о вышеуказанных и других экспериментах приведена в работах [8, 9].

В целом на сегодняшний день можно утверждать, что точность получаемых результатов достаточна для расчетов пожарного риска и решения других задач пожарной безопасности.

Однако, несмотря на весьма широкий спектр инженерных задач, потенциально решаемых с помощью программ моделирования пожаров, как показывает практика, их применение в основном ограничивается стадией проектирования объектов (расчет пожарного риска, выбор оптимальных проектных решений и др.). На стадии же эксплуатации зданий возможности такого программного обеспечения практически не применяются.

В особенности, хотелось бы обратить внимание на процесс подготовки планов тушения пожаров. В большинстве случаев при их составлении обычно пользуются уже устаревшими методами: упрощенным «геометрическим» способом определяют площадь пожара к моменту ввода первых стволов, делают расчет сил и средств (например, в Excel), графическую часть выполняют вручную или, например, в Visio, затем всё это оформляют в текстовом редакторе типа Word. При этом очень важная, основополагающая часть планирования – прогноз развития пожара – выполняется без использования современных и мощных программ моделирования пожаров, позволяющих сделать это на высоком уровне (с достаточно высокой точностью).

Простым, но наглядным примером может послужить пожар в пятиэтажном общежитии, произошедшем в г. Сухой Лог. Несмотря на то, что площадь пожара, возникшего в комнате на

первом этаже, составила всего 10 м², его результатом стала гибель молодой семьи от отравления продуктами горения на самом дальнем от очага пятом этаже. Причем одной из причин, способствующих быстрому распространению опасных факторов пожара на верхние этажи, стало вскрытие остекления при тушении [10, 11]. Этот пример показывает, что даже в таких зданиях обычной коридорной планировки динамика распространения продуктов горения может быть не всегда очевидной и легко предсказуемой. В то же время, при моделировании с помощью компьютерной программы это очень хорошо видно (рис. 3). Поэтому возможности подробного анализа развития пожара при составлении планов тушения пожара с использованием компьютерных моделей сложно переоценить.

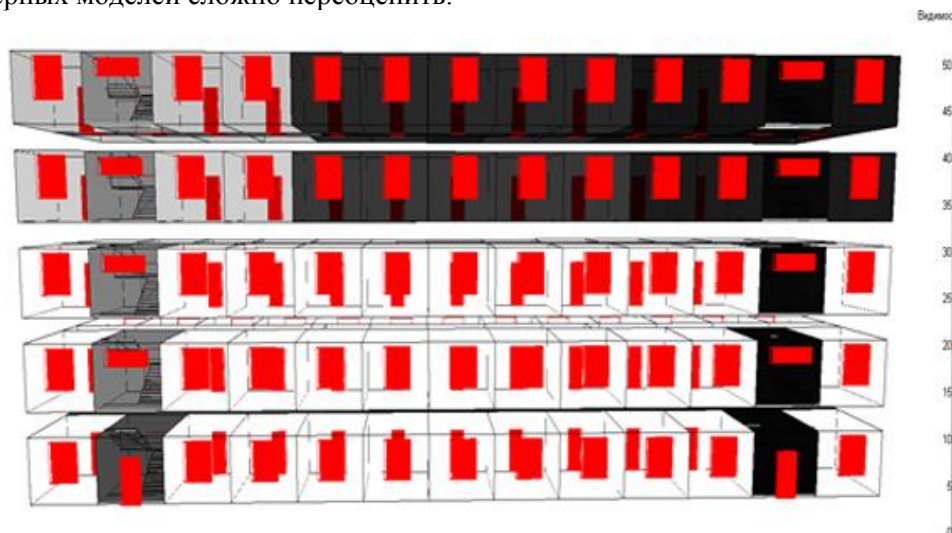


Рис. 3. Задымление лестниц и помещений общежития

Количество и качество получаемой с помощью моделирующих программ информации о развитии пожара в зданиях, такой как: среднеобъемная температура, задымлённость, концентрация кислорода и продуктов горения, характер их распространения по путям эвакуации – позволит не только автоматизировать процесс расчета сил и средств, необходимых для тушения пожара, но и учесть множество различных факторов и особенностей развития пожара в здании, и, тем самым, значительно повысить качество подготовки личного состава к тушению пожара, обеспечить своевременную и безопасную эвакуацию людей.

Для этого в программу СИТИС: ВИМ добавлен специальный модуль, позволяющий на основе результатов моделирования пожара автоматизировать процесс составления планов тушения пожара и, в частности, выполнять расчет сил и средств, необходимых для его тушения. В модели распространения пожара реализованы функции, позволяющие в любой момент времени определять не только площадь пожара, но и его периметр, фронт, а также площадь тушения с учетом глубины тушения стволов (рис. 4).

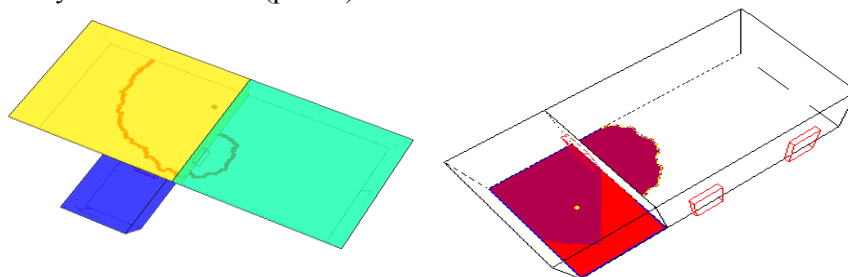


Рис. 4. Автоматическое определение параметров пожара и площади тушения

В дальнейшем планируется расширять функционал программы: необходимо обеспечить проведение всего спектра расчетов, которые могут быть необходимы при составлении планов тушения пожаров, а также прорабатываются варианты реализации в программе анализа своевременности прибытия и достаточности сил и средств, исходя из оперативно-тактических характеристик имеющейся в конкретном гарнизоне пожарной техники и последовательности прибытия пожарных подразделений в соответствии с утвержденным расписанием выездов.

В качестве еще одной задачи развития интегральной модели пожара мы видим ускорение производимых вычислений. Дело в том, что при вычислениях в рамках интегральной модели применяется метод итераций. В каждый момент времени в каждом помещении здания вычисляется давление, при котором выполняется баланс массы и энергии с заданной точностью. Определяя давление в i -ом узле гидравлической схемы здания, принимается, что давления во всех узлах, связанных с i -ым, известны и равны давлениям на предыдущем временном шаге. После того, как в процессе решения достигается заданная точность, осуществляется переход к $i+1$ -му узлу. Однако, при сведении баланса массы в $i+1$ -ом узле схемы, баланс массы в i -ом узле нарушается. Для того, чтобы получить удовлетворительную точность решения балансовых уравнений для здания в целом, организуется итерационный процесс, суть которого состоит в многократном повторении расчета давлений во всех узлах схемы (помещениях здания) до тех пор, пока при допустимой погрешности решения давления во всех узлах не перестанут изменяться. При большом количестве помещений в здании такой подход требует больших временных ресурсов, так как требует последовательного выполнения иногда до нескольких тысяч и даже десятков тысяч итераций. В настоящее время в Уральском институте ГПС МЧС России ведется работа по повышению эффективности такого расчета за счет использования технологий параллельных вычислений на графических процессорах (GPGPU).

GPGPU (англ. General-purpose graphics processing units) – техника использования графического процессора видеокарты, позволяющая выполнять расчёты для общих вычислений, не связанных с компьютерной графикой. В настоящее время существует несколько технологий использования видеокарт, имеющих свои преимущества и недостатки. Так, например, технология CUDA реализуется только на видеокартах nVidia, ATI Stream – только на видеокартах ATI, DirectCompute и OpenCL – только на самых современных видеокартах, поддерживающих эти технологии. Как наиболее универсальная, реализуемая практически на всех применяемых сегодня персональных компьютерах и ноутбуках, нами выбрана технология C++ AMP (Accelerated Massive Parallelism). Эта технология позволяет в процессе выполнения программы делать проверку, сможет ли определенный код быть выполнен на процессоре видеокарты, и если это по каким-либо причинам невозможно, то вычисление происходит на центральном процессоре. Таким образом, внедрение современных технологий, увеличивая вычислительную мощность программы, не повышает требования к аппаратному обеспечению.

При успешной реализации данного проекта более высокая скорость вычислений позволит увеличить точность вычислений без значительного увеличения времени расчета.

Литература

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебн. пос. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. – 118 с.
2. Соколов С.В. Имитационная система моделирования развития и тушения пожара в здании и разработка на её основе тренажера по организации тушения пожаров // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2008. – №2. – С.102-106.
3. Субачев С.В. Моделирование пожаров в зданиях. Программная реализация и применение в системе подготовки специалистов пожарной безопасности: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 99 с. – ISBN 978-3-8443-5008-1.
4. Субачева А.А. Подготовка специалистов пожарной безопасности. Дидактическое сопровождение специальных дисциплин на основе компьютерного моделирования: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 275 с. – ISBN 978-3-8484-3266-0.
5. www.sitis.ru.
6. <http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Validation>.
7. Walter W. Jones Richard D. Peacock, Glenn P. Forney Paul A. Reneke. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6): Technical Reference Guide / NIST Special Publication 1026, 2009.
8. Руководство по валидации «СИТИС: ВИМ». – Екатеринбург: ООО «СИТИС», 2011. – 25 с.
9. Карькин И.Н. Валидация интегральной модели пожара в зданиях // Гражданская защита – 2011: материалы 6-й международной научно-практической конференции. – Академия МВД, София, Болгария, 24-25 марта 2011 г.: в 2 ч. Ч.1. – София, 2011. – С. 18-22.

10. Сысоев В.А., Субачева А.А. Анализ произошедшего пожара с помощью вероятностной интегральной модели пожара в здании // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2012. – С. 146-148.
11. Субачева А.А. Перспективы применения методов моделирования пожаров для экспертизы произошедших пожаров // Безопасность критичных инфраструктур и территорий: материалы V Всероссийской конференции и XV школы молодых ученых. – Екатеринбург: УрО РАН, изд-во АМБ, 2012. – С.178-180.