

А.А. Субачева, С.В. Субачев

(Уральский институт ГПС МЧС России; e-mail: sergey-subachev@yandex.ru)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА С НАТУРНЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

Проведена сравнительная оценка результатов моделирования пожара с использованием программы "СИТИС: ВИМ" с результатами натурных экспериментов. Показана необходимость дальнейшего совершенствования математических моделей пожаров.

Ключевые слова: моделирование пожаров в зданиях, интегральная модель, валидация.

A.A. Subacheva, S.V. Subachev

COMPARATIVE EVALUATION OF INTEGRAL MATHEMATICAL MODEL OF FIRE WITH FIELD EXPERIMENTS OF FIRE

A comparative evaluation of the fire simulation results using program "SITIS: VIM" with the results of field experiments are presented. Shows the need for further improvement of mathematical models of fires.

Key words: modeling of fires in buildings, integral model, validation.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 25 декабря 2014 г.

1. Краткое описание модели и экспериментов

В программе "СИТИС: ВИМ", применяемой для прогнозирования развития пожаров в зданиях и расчёта пожарного риска, используется интегральная математическая модель пожара, описывающая изменение среднеобъёмных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара, которая впервые была сформулирована в 1976 г. Ю.А. Кошмаровым [1].

Основные уравнения модели получены из уравнений сохранения массы и энергии для открытой термодинамической системы. Для определения газообмена между помещениями и моделирования на его основе распространения продуктов горения по зданию в целом здание заменяется гидравлической схемой – графом, узлы которого моделируют помещения здания, а ветви – связи между ними (проёмы), через которые осуществляется движение воздуха и продуктов горения [2].

Дифференциальные балансовые уравнения и система уравнений, описывающая газообмен в соответствии с гидравлической схемой здания, решаются численно с применением метода секущих и метода итераций.

Расчёт площади пожара в каждый момент времени производится с использованием вероятностной модели распространения пожара по площади, разработанной в 2008 г. [3, 4], позволяющей моделировать не только круговое и линейное распространение пожара, но и произвольное, определяемое расположением и формой площади, занятой горючей нагрузкой, её характеристиками, формой помещения, наличием противопожарных преград и др.

Локальные значения опасных факторов пожара на уровне рабочей зоны определяются исходя из распределения их величин по высоте помещения, полученного Т.Г. Меркушкиной, Ю.С. Зотовым и В.Н. Тимошенко [5].

Проведено сравнение результатов моделирования с данными натуральных 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, в это понятие можно включить ещё и процесс корректировки модели с целью построения алгоритмов, позволяющих получить максимально достоверные результаты.

2. Серия экспериментов "NBS Multi-Room"

Первую такую корректировку авторы 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 установка состояла из двух помещений, соединённых между собой коридором, имеющим один выход наружу (рис. 1). Мощность источника тепловыделения (газовая горелка) составляла 100 кВт.

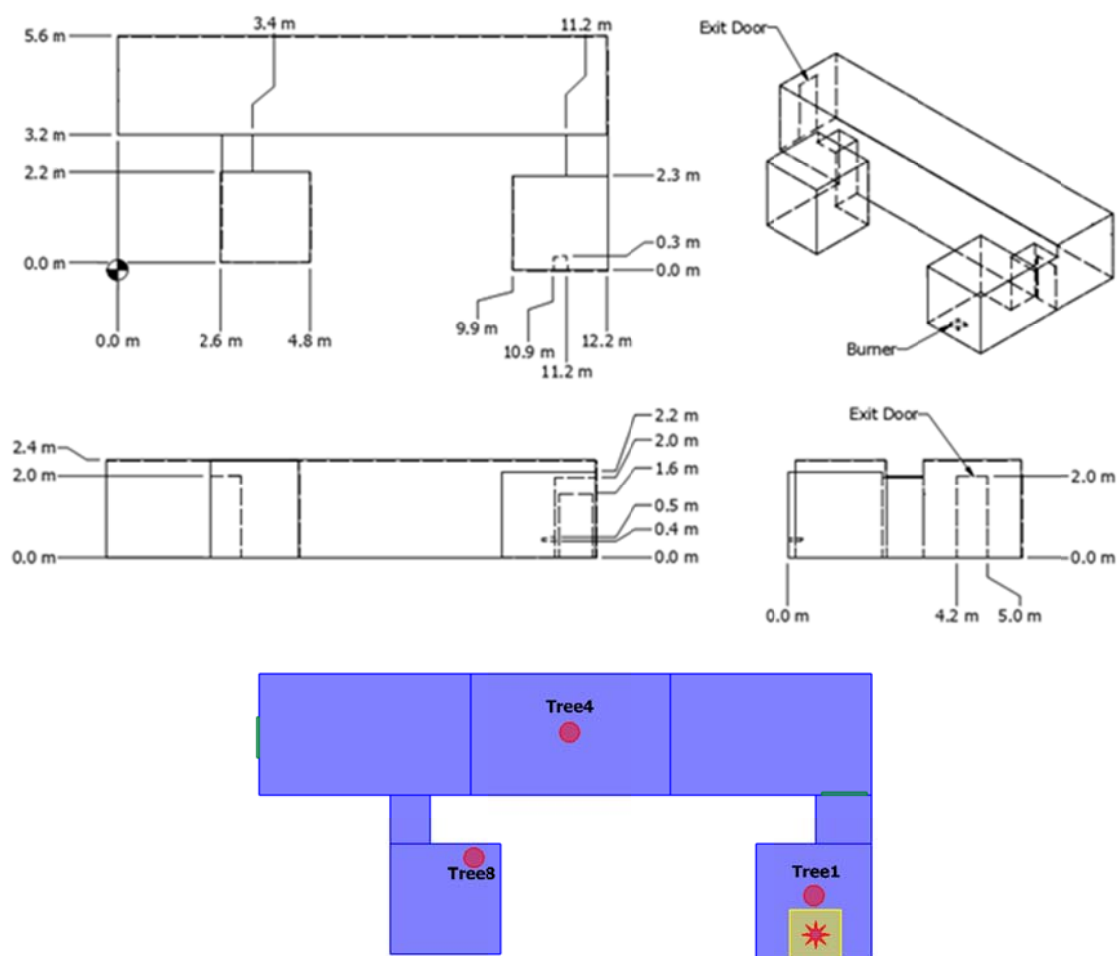


Рис. 1. Схема стенда "NBS Multi-Room" и вид его модели в программе "СИТИС: ВИМ"

Замер температуры производился с использованием нескольких шлейфов термопар (равномерно распределённых по высоте). Среднеобъёмное значение температуры определяли путём интегрирования показаний термопар в шлейфе по высоте.

Результаты моделирования показали, что методика расчёта параметров теплообмена требует уточнения. По упрощённой методике, предложенной М.П. Башкирцевым [1] и ранее используемой в интегральной модели, температура стен определялась только исходя из температуры газовой среды (каждой температуре газовой среды соответствует определённая температура стен). Это приводило к быстрой стабилизации параметров моделируемого пожара (рис. 2, график "ВИМ1").

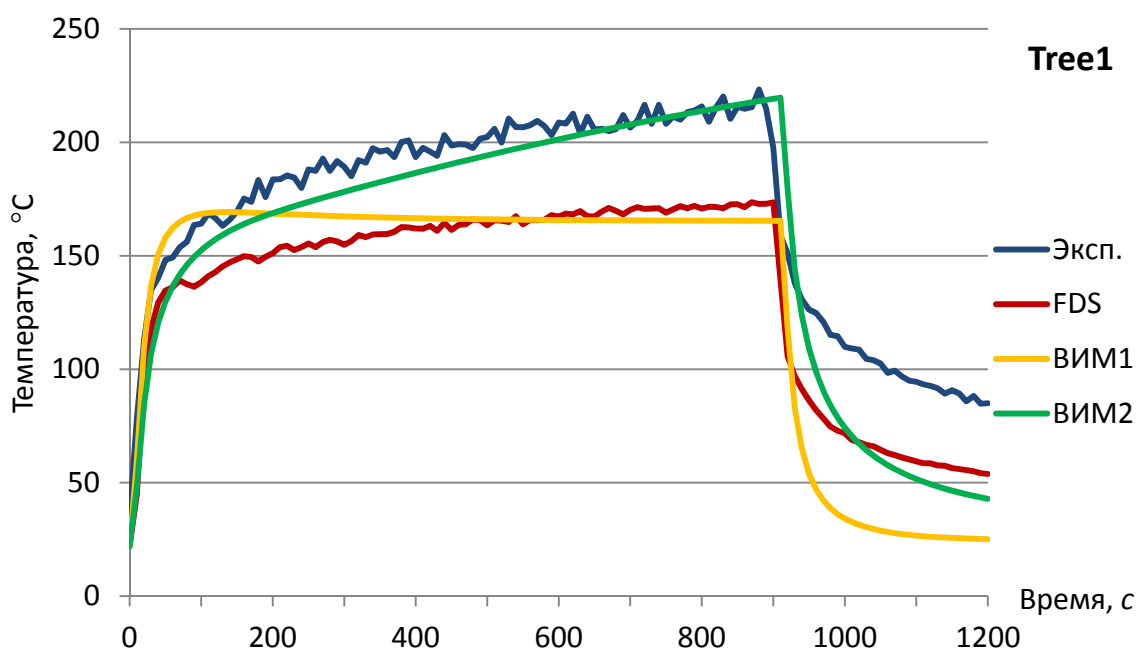


Рис. 2. Среднеобъёмная температура воздуха в помещении очага пожара при упрощённой (ВИМ1) и уточнённой (ВИМ2) методике расчёта параметров теплообмена с ограждающими конструкциями

Поэтому авторами была реализована методика расчёта температуры ограждающих конструкций с учётом их постепенного прогрева. За основу 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 (рис. 2, график "ВИМ2") при увеличении в 2 раза коэффициента пропускания "виртуальных" проёмов (в местах соединения частей, на которые разбивается помещение, если один из линейных размеров превышает два других более чем в 5 раз).

3. Серия экспериментов "NIST/NRC"

Данная серия полномасштабных испытаний организована Национальным научно-исследовательским советом (NRC) и проведена Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) США в рамках исследования по валидации в июне 2003 г. Мощность горения составляла от 350 кВт до 2,2 МВт в помещении размером 21,7×7,1×3,8 м (рис. 3), сооруженном в виде отсека атомной электростанции, предназначенного для размещения силовых и контрольных кабелей.

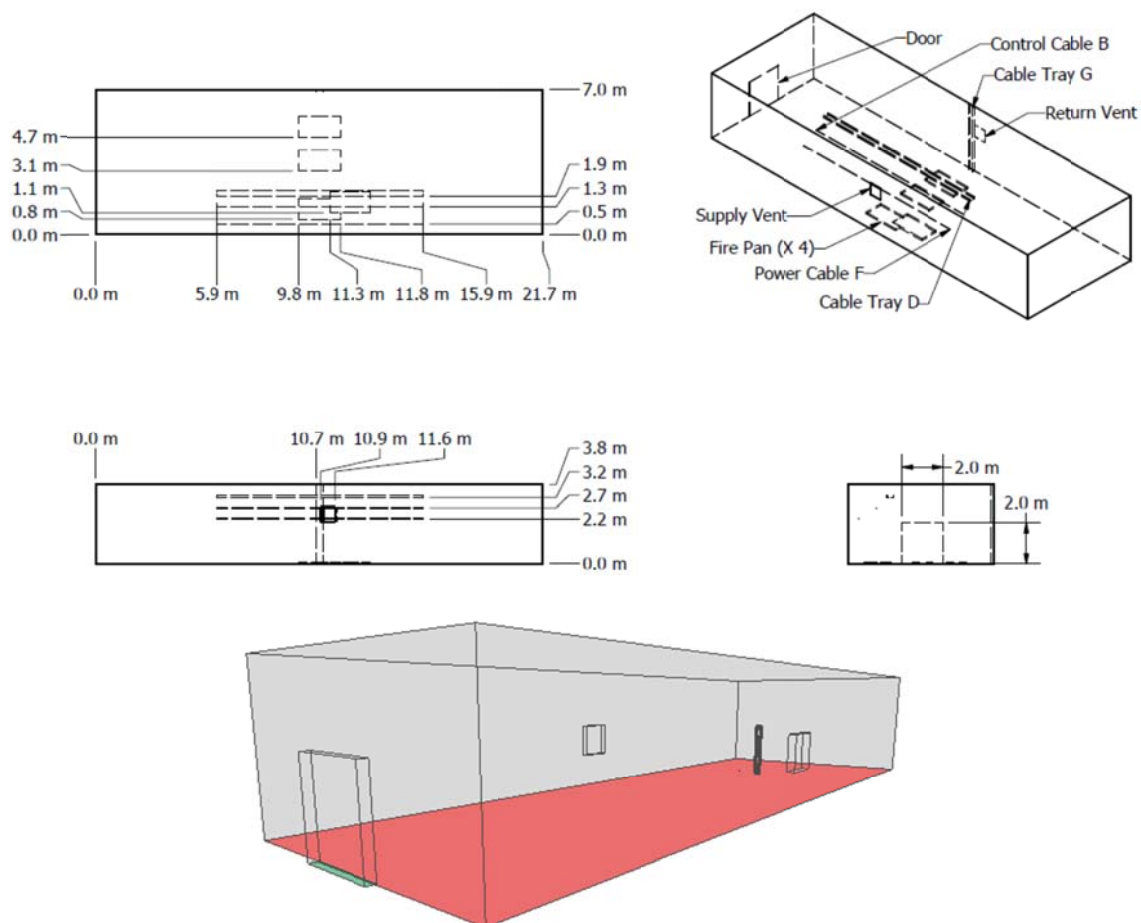


Рис. 3. Схема помещения в эксперименте "NIST/NRC" и вид его модели в программе "СИТИС: ВИМ"

Помещение было оборудовано одной дверью размером 2×2 м и механической приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей около 5 обменов воздуха в час. Приточный воздуховод был расположен на южной стене на расстоянии около 2 м от пола. Вытяжной воздуховод с равной площадью отверстия был расположен на противоположной стене в аналогичном месте.

В качестве источника тепла в испытаниях использовался один распылитель жидкого углеводородного топлива (гептана) на лоток размером 1×2 м и глубиной около 0,1 м. Скорость выделения тепла определялась методом калориметрии поглощения кислорода.

Параметры вентиляции и источника тепловыделения в различных испытаниях приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ эксперимента	Источник тепловыделения	Состояние двери	Состояние вентиляции
07	гептан; 0,776 л/мин	закрыта	отключено
17	гептан; 1,983 л/мин	закрыта	отключено
02	гептан; 2,307 л/мин	закрыта	отключено
10	гептан; 2,307 л/мин	закрыта	приток $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$; отток $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$
16	гептан; 4,46 л/мин	закрыта	приток $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$; отток $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$
09	гептан; 2,269 л/мин	открыта	отключено
05	гептан; 2,307 л/мин	открыта	приток $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$; отток $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$

В интегральной модели не предусмотрены алгоритмы, которые каким-либо образом учитывали бы негерметичность помещения. Поэтому в испытаниях со слабым газообменом (№№ 02, 07, 17) наблюдается завышение температуры. Особенно это видно в случае с наиболее мощным источником тепловыделения (№ 02), когда температура значительно завышается, а затем, после выгорания кислорода, падает (рис. 4).

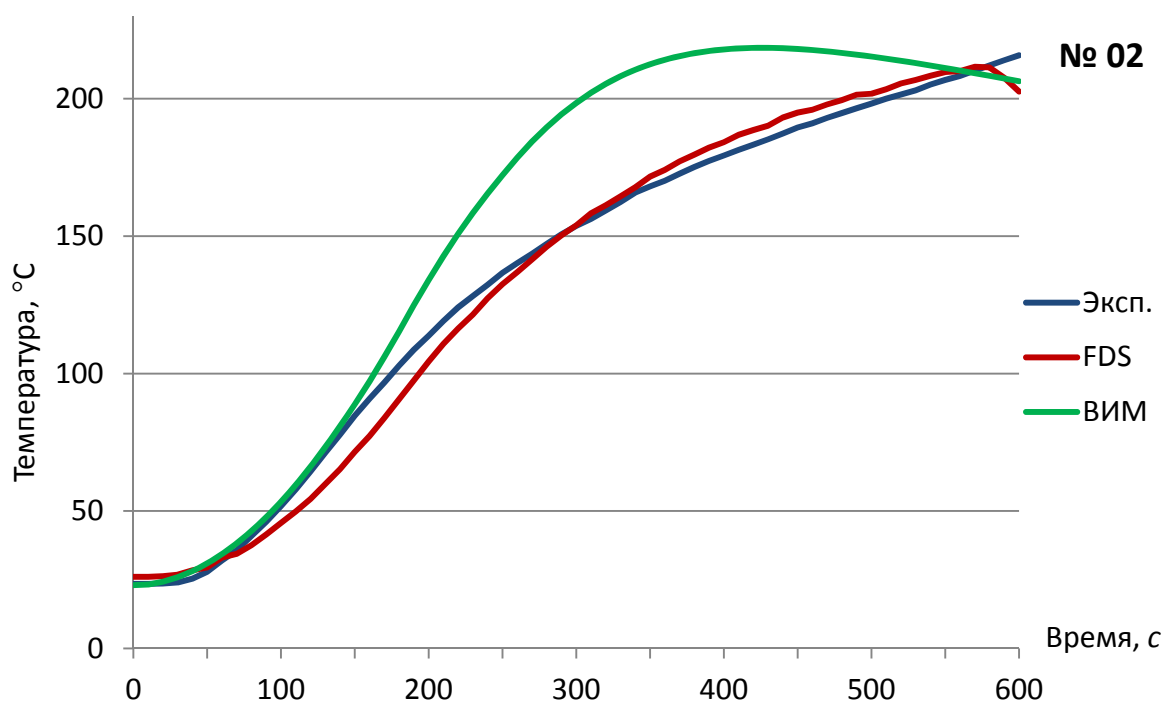


Рис. 4. Среднеобъемная температура воздуха в эксперименте № 02

Аналогичные результаты получены при сравнении с испытаниями при закрытой двери, но при работающей вентиляции (№№ 10, 16): чем больше мощность тепловыделения, тем больше завышается температура. Однако необходимо учесть, что при моделировании в программе "СИТИС: ВИМ" указывались характеристики вентиляции, аналогичные указанным во входном файле

FDS (в течение времени от начала испытания до 180 с мощность увеличивается от 60 до 100 %, затем постепенно до конца испытания уменьшается до 90 %). Возможно, такая настройка существенно отличается от неизвестных нам характеристик вентиляции натурального эксперимента, что и обуславливает дополнительную погрешность.

В испытаниях с открытой дверью (№№ 05, 09) сходимость результатов значительно лучше, особенно в начальной стадии горения: общая динамика нарастания температуры воздуха и в качественном, и в количественном отношении практически совпадает с результатами эксперимента (рис. 5, 6).

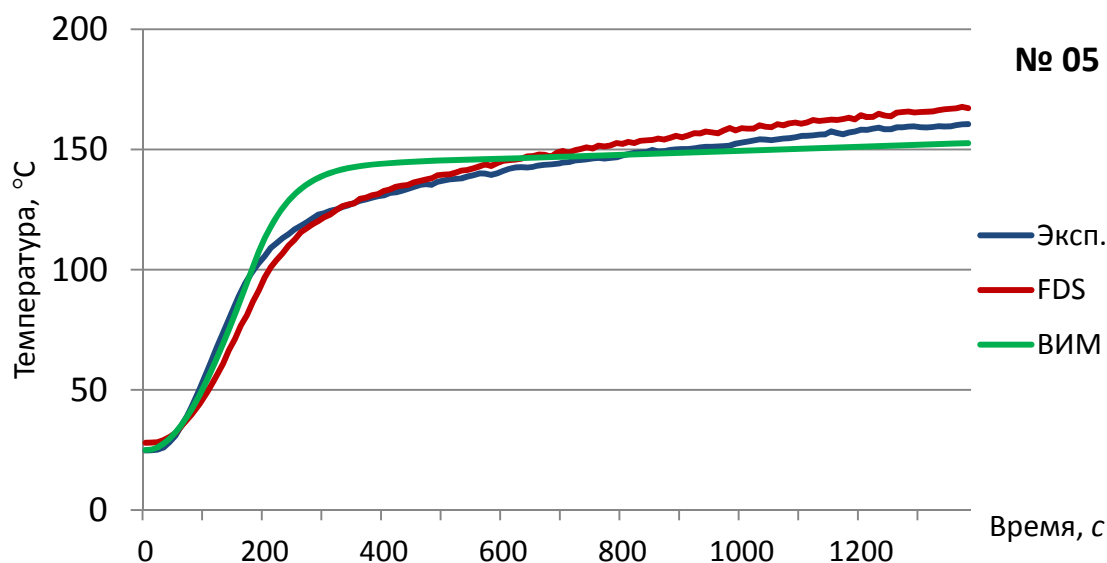


Рис. 5. Среднеобъемная температура воздуха в эксперименте № 05

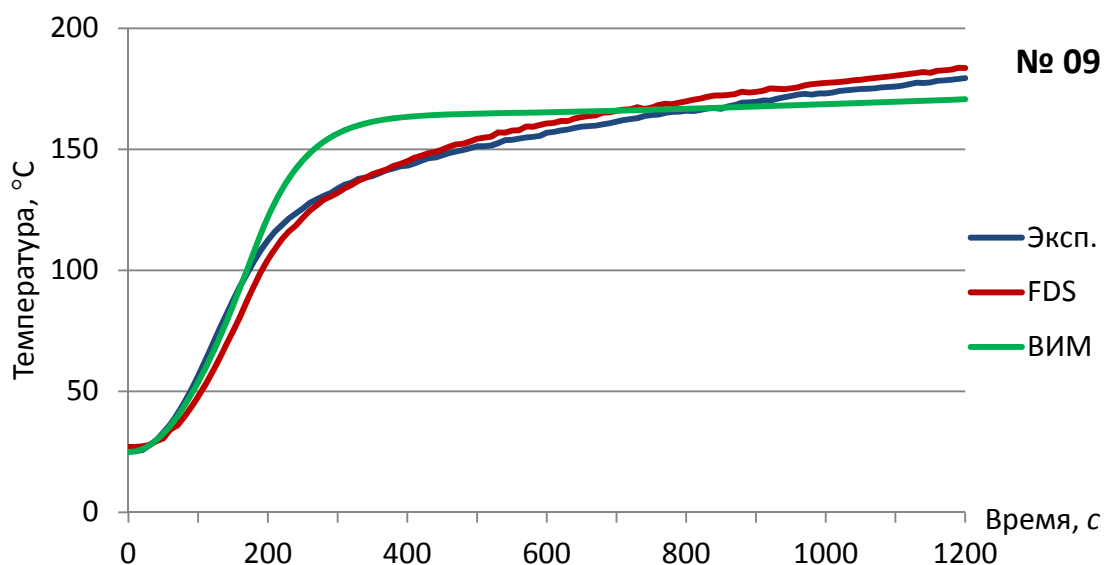


Рис. 6. Среднеобъемная температура воздуха в эксперименте № 09

4. Эксперимент "The Dalmarnock Fire Tests"

Серия экспериментов и лабораторных испытаний "The Dalmarnock Fire Tests" была проведена в 2006 г. группой учёных Эдинбургского университета [8].

Эксперименты проводились для целей валидации дифференциальных моделей пожаров в 3-комнатной квартире жилого дома, обставленной аналогично офисному помещению: компьютерная и оргтехника, шкафы с бумагами и т.п. (рис. 7).

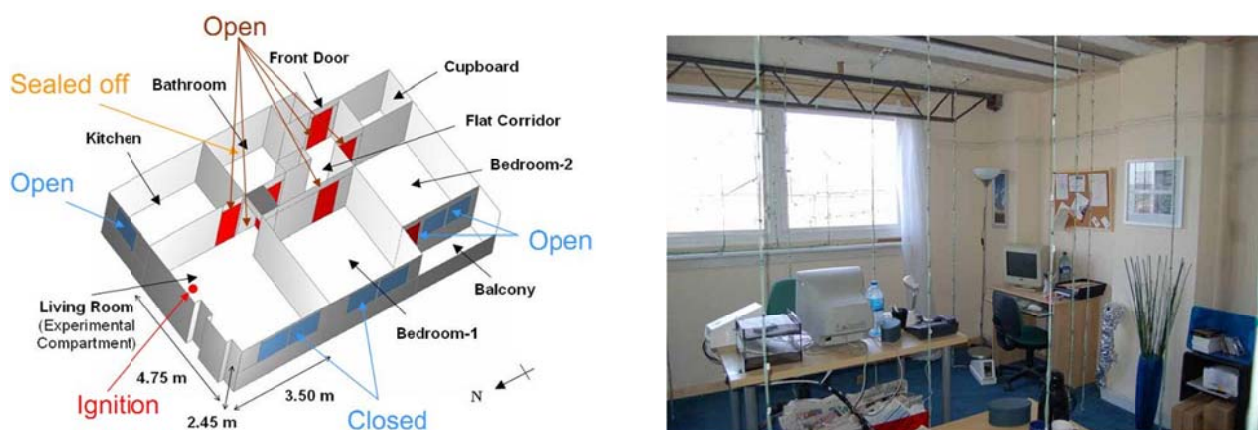


Рис. 7. Схема и вид офиса (из документа [8])

В данном эксперименте, в отличие от других, применялись не специальные источники тепла, такие как газовая горелка нормированной мощности, а типовая горючая нагрузка административного помещения, свойства которой известны [1]. Поэтому была возможность смоделировать два сценария развития пожара:

- априорный, то есть такой сценарий, который был бы разработан пользователем, не знакомым с результатами натуральных экспериментов;
- апостериорный, то есть сценарий, который можно смоделировать с учётом важных особенностей развития конкретного произошедшего пожара (сначала горение корзины с бумагами, потом воспламенение дивана, шкафа с документами и т.д.).

В качестве горючей нагрузки для априорного сценария принята горючая нагрузка "Административное помещение; мебель + бумага (0,75 + 0,25)" из базы данных [1], занимающая всю площадь помещения, с источником зажигания, расположенным в её центре (рис. 8, а).

Результаты моделирования представлены ниже (рис. 9).

Скорость нарастания температуры воздуха и максимальная его температура в развитой, квазистационарной стадии пожара (300-600 с) по результатам моделирования соответствуют экспериментальным, что подтверждает адекватность справочных данных о свойствах горючей нагрузки административного помещения.

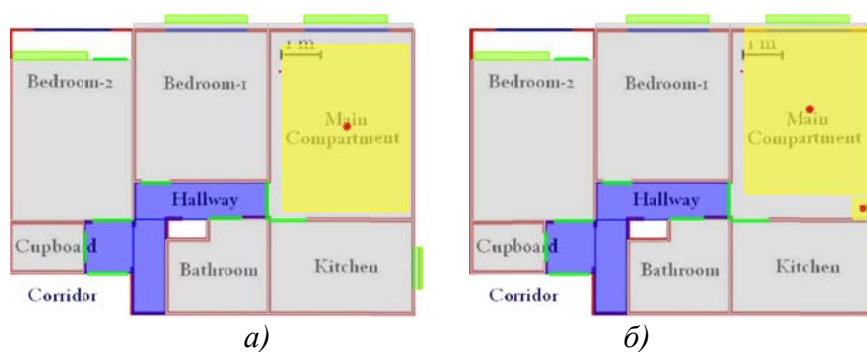


Рис. 8. Модель офиса в программе "СИТИС: ВИМ" для априорного (а) и апостериорного (б) сценария развития пожара

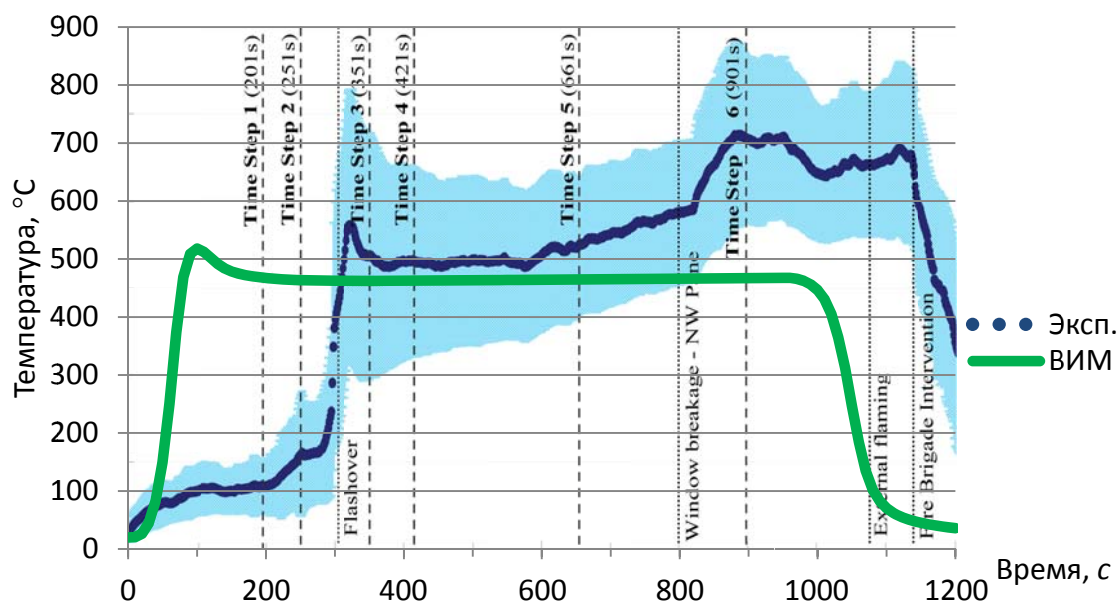


Рис. 9. Результаты априорного моделирования

Кроме того, имеется важное сходство в том, что при достижении максимальной площади горения в момент около 100 (модель) и 300 (эксперимент) секунд из-за недостатка кислорода наблюдается снижение скорости тепловыделения и небольшое, примерно одинаковое падение температуры воздуха. Это говорит об адекватном моделировании скорости поступления воздуха в помещение и её влияния на коэффициент полноты сгорания горючего материала.

Отличие в графиках в первой стадии пожара обусловлены характером его распространения: при проведении эксперимента сначала горела только корзина с бумагами, а воспламенение дивана, шкафа и других предметов началось спустя 250-300 секунд.

Чтобы проверить эту гипотезу был смоделирован апостериорный сценарий, в котором предусмотрено две поверхности горения: одна из них (имитирующая горение корзины) имеет площадь $0,25 \text{ м}^2$ и воспламеняется в начальный момент времени, а другая занимает остальную площадь помещения и воспламеняется через 250 секунд. Свойства обеих поверхностей горения приняты такими же, как в первом сценарии.

В этом случае результаты моделирования с качественной точки зрения стали очень схожими с экспериментальными данными (рис. 10).

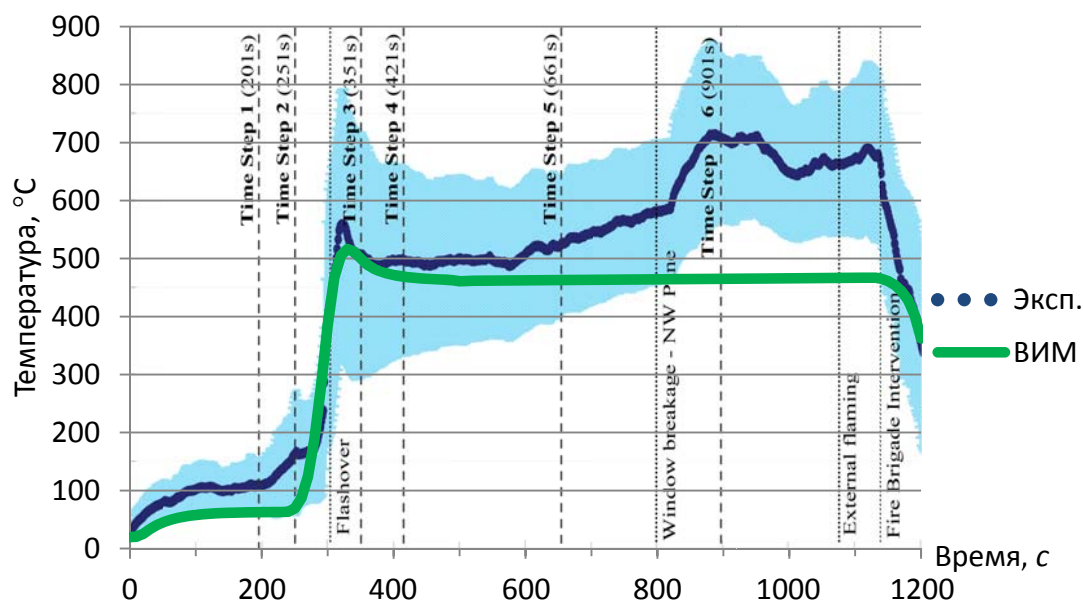


Рис. 10. Результаты апостериорного моделирования

Количественное расхождение графиков в первые 300 секунд горения, вероятно, вызвано тем, что горение одной корзины с бумагами не входит в область применения интегральной модели пожара: размер очага пожара должен быть соизмерим с размером помещения.

Расхождения графиков после 600 секунд горения, по мнению авторов, обусловлены также особенностями развития пожара в данном конкретном случае, например, обрушением сгоревших шкафов с документами, что могло привести к нагреванию измерительных термопар непосредственно пламенем, а не воздухом.

5. Выводы

Валидация расчётной модели "СИТИС: ВИМ" выявила очень важные неточности в расчётах, исправление которых позволило улучшить прогнозирующую способность модели как в качественном, так и в количественном отношении.

В рамках данной публикации не представляется возможным описать все проведённые авторами эксперименты, но, обобщив, можно сделать следующие краткие выводы.

Выявлена необходимость увеличения коэффициента пропускания фиктивных проёмов в 2 раза. Авторы полагают, что эти проёмы должны пропускать воздушные потоки с меньшим сопротивлением, чем дверные или оконные проёмы, так как в них нет завихрения воздуха. Это подтверждается сравнением расчётных и экспериментальных данных.

Внесены изменения в методику расчёта теплообмена газовой среды с ограждающими конструкциями конвекцией и добавлен теплоперенос излучением, что значительно повысило точность модели.

Вышеуказанные изменения реализованы в "СИТИС: ВИМ 1.40".

В версии 1.50 реализован алгоритм расчёта газообмена в горизонтальных проёмах не только за счёт разности давлений, но и за счёт разности температур воздуха.

Острый недостаток экспериментальных данных не позволяет полностью изучить прогнозирующую способность модели "СИТИС: ВИМ". Основываясь же на представленных выше, а также опубликованных ранее [9] результатах экспериментов, можно сказать, что прогнозы модели ВИМ в отношении среднеобъёмной температуры согласуются с экспериментальными данными с погрешностью 10-25 %. В целом, температура чаще завышается, чем занижается. В основном такой точности достаточно для расчётов пожарного риска и решения других задач пожарной безопасности.

Следует также отметить, что результаты априорного моделирования (которое представляют собой все расчёты, выполняемые в целях оценки пожарного риска) могут существенно отличаться от результатов апостериорного моделирования уже произошедших, известных пожаров. Однако это является методологической проблемой анализа риска и не является недостатком моделей пожаров.

В заключение необходимо отметить наиболее существенные, по нашему мнению, проблемы повышения прогнозирующей способности существующих программ моделирования пожаров.

1. Недостаточное количество проведённых натуральных экспериментов, практически нет информации об экспериментах с вертикальным газообменом (по лестничным клеткам, атриумам и др.).

2. В опубликованных отчётах, в основном, приводится информация только об изменении температуры. Другие опасные факторы пожара (ОФП) либо не измерялись, либо информация о них приводится в объёме, не достаточном для проведения сравнительного анализа.

3. Недостаточно информации о динамике ОФП при реально произошедших пожарах. При тушении пожаров точное измерение всех ОФП по понятным причинам никогда не делается, можно лишь приблизительно оценить их величины по косвенным признакам, приведенным в описаниях пожаров (сильное задымление, разрушение остекления из-за высокой температуры и т.п.). Такой опыт уже имеется [10], и необходимо продолжать эту работу.

Поэтому весьма актуальной и необходимой представляется задача дальнейшей валидации моделей пожаров: с анализом сходимости результатов не только по температуре, но и по всем остальным опасным факторам пожара, с различными планировками зданий и характеристиками горючей нагрузки, а также с учётом работы противопожарных систем.

Литература

1. **Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. 118 с.
2. **Гутов В.Н., Лицкевич В.В.** Математическая модель развития пламенного горения в здании // Пожаровзрывобезопасность. 1994. Т.3. № 4. С.58-65.
3. **Субачев С.В., Субачева А.А.** Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы // Прикладная информатика. 2008. № 4. С.27-37.
4. **Субачев С.В.** Моделирование пожаров в зданиях: программная реализация и применение в системе подготовки специалистов пожарной безопасности. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 99 с. ISBN 978-3-8443-5008-1.
5. **ГОСТ 12.1.004-91.** ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
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. <http://www.see.ed.ac.uk/FIRESEAT/2007.html>.
9. **Руководство** по валидации "СИТИС: ВИМ". Екатеринбург: ООО "СИТИС", 2011. 25 с.
10. **Субачева А.А.** Перспективы применения методов моделирования пожаров для экспертизы произошедших пожаров / Безопасность критических инфраструктур и территорий: материалы V Всероссийской конференции и XV школы молодых учёных. Екатеринбург: УрО РАН, Изд-во АМБ, 2012. С.178-180.