Проблемы применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска*

К. Ю. Литвинцев[1,†], Е. С. Кирик[2], Е. А. Ягодка[3]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

[3]Академия государственной противопожарной службы МЧС РФ, Москва, Россия

[†]Контактный e-mail: sttupick@yandex.ru

В России оценка пожарной опасности с использованием численного моделирования развития пожара и эвакуации проводится согласно Методике определения расчетных величин пожарного риска, изданной МЧС России в 2009 г. С 2010 г. началась сотрудничество ИТ СО РАН и ИВМ СО РАН по разработке программы "Сигма ПБ", позволяющей моделировать распространение опасных факторов пожара и эвакуацию людей из зданий. В ходе разработки программы и накопления опыта ее использования, наблюдения за практикой реализации других программ, а также в результате анализа разработанной методики и другой методической литературы обозначились проблемы, вызванные низким уровнем нормативной документации, регламентирующей использование наукоемких расчетных методов, и отсутствием системы подготовки специалистов для проведения и проверки таких расчетов. В статье раскрыты некоторые аспекты проблем, связанные именно с применением численного моделирования развития пожара и эвакуации.

Ключевые слова: эвакуация, развитие пожара, численное моделирование, пожарный риск.

Библиографическая ссылка: Литвинцев К.Ю., Кирик Е.С., Ягодка Е.А. Проблемы применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 4. С. 56–69. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.005.

Введение

Современный уровень развития вычислительной техники способствует тому, что использование численного моделирования для решения практических задач в различных областях человеческой деятельности приобретает массовое явление. Одним из таких видов деятельности является обеспечение пожарной безопасности. В России оценка пожарной опасности с применением численного моделирования проводится согласно Методике определения расчетных величин пожарного риска (далее — Методика) [1].

Основные расчетные действия, предписанные Методикой и связанные с применением численного моделирования, это — определение времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара (ОФП) (достигается за счет моделирования развития

*Title translation and abstract in English can be found on page 69.

© ИВТ СО РАН, 2019.

пожара) и времени эвакуации людей из отдельных частей здания и здания в целом (достигается путем моделирования эвакуации). Для моделирования развития пожара и определения времени блокирования путей эвакуации допускается использование интегральной (балансовой), зонной или полевой (на основе методов вычислительной гидродинамики, CFD) моделей, для моделирования процесса эвакуации и определения времени эвакуации на путях из здания — упрощенно-аналитической, имитационно-стохастической или индивидуально-поточной моделей.

Специфика моделей и сложность решаемых задач таковы, что применять моделирование возможно только с использованием компьютера, а для этого требуются вычислительные способы представления моделей и численные алгоритмы. В Методике все модели представлены только в математической постановке. В то же время численная реализация любой из моделей — не тривиальная задача. Другим условием эффективного применения расчетных методов является необходимая квалификация специалиста, выполняющего расчеты, который способен сделать постановку задачи, создать расчетную область, выбрать параметры математической модели, задать граничные и начальные условия, интерпретировать полученные результаты моделирования. Замыкают цепочку представители проверяющих организаций (это либо специалисты органов государственного пожарного надзора, либо сотрудники государственной и негосударственной экспертиз проектной документации, строительного надзора, судебные эксперты), которые должны давать и правовую и содержательную оценку выполненным расчетам и выводам. Это предъявляет к ним определенные требования в понимании применения численного моделирования.

В настоящей статье рассмотрены проблемы, проявившиеся в ходе применения численного моделирования для решения задач в области пожарной безопасности, их причины, возможные пути и примеры решения. Представленные предложения основаны на опыте, полученном в ходе разработки программы для расчета пожарных рисков “Сигма ПБ” и ее реализации, наблюдения за практикой использования других программ, применяемых для расчетов величин пожарного риска, а также на анализе разработанной Методики и методической литературы.

1. Математические модели Методики и методы анализа: проблемы применения

Наиболее универсальным методом моделирования развития пожара является полевой метод (CFD), модели эвакуации — модель индивидуально-поточного типа. Обе являются наиболее вычислительноемкими, но в силу существенного роста производительности вычислительной техники их использование стало доступным для массового применения в инженерных расчетах при решении задач пожарной безопасности. Рассмотрим практику применения этих моделей.

1.1. Моделирование развития пожара

Полевой метод моделирования развития пожара [1–4] позволяет проводить наиболее детальный анализ его протекания. Для любой стадии развития пожара в объеме расчетной области искомыми в модели являются поля плотности, давления газовоздушной среды, температуры, скорости, концентрации газов, оптической плотности дыма (натуральный показатель ослабления интенсивности излучения в дисперсной среде).

Проблемным местом является описание полевой модели в Методике, в Методике представлены только уравнения Навье — Стокса, уравнение сохранения энергии и уравнение переноса компонентов, все описание которых составляет чуть более одной страницы. Необходимо сформулировать базовые принципы, связанные с построением расчетной области (включение или невключение в расчетную область помещений здания), задать допустимые граничные условия на теплообмен с ограждающими конструкциями здания, граничные условия, описывающие связь с внешней средой (какие проемы учитывать и как, какие условия ставить на открытых внешних границах), а также начальные условия (распределение температуры, параметры горючей нагрузки).

Численное решение системы дифференциальных уравнений предполагает дискретизацию расчетной области (создание сетки). Часто у пользователей (экспертов) отсутствует понимание, для чего это делается, какими способами достигается, как сказывается на результате моделирования. Сегодня в программах, используемых для моделирования развития пожара в РФ, наибольшее распространение получил метод дискретизации на основе декартовых сеток с однородным или блочно-однородным шагом сетки. Фактически в подавляющем большинстве случаев используют однородный шаг сетки из-за сложности построения областей с разным шагом. Это позволяет воспроизвести расчетную область с точностью до размера ячейки. И чем больше шаг дискретизации, тем больше эти отклонения, иногда, например, происходит “исчезновение” стен между помещениями. Особенно остро эта проблема стоит при искажении ширины проемов (уменьшение / увеличение), поскольку изменение реальных размеров может достигать 50 %, что сильно сказывается на характере течения. Кроме того, искажается форма неортогональных элементов геометрии здания (рис. 1). Этот способ в решении задач в области пожарной безопасности может быть не всегда приемлем, так как он порой не позволяет учитывать реальные (или желаемые) линейные размеры отдельных элементов в расчете без использования малого шага дискретизации, который, в свою очередь, ведет к построению сеток размером в десятки, а иногда и в сотни миллионов ячеек.

Одним из альтернативных подходов к дискретизации расчетной области является использование неортогональных многоблочных структурированных сеток на основе шестигранных ячеек (контрольных объемов, КО), которые применяются в авторской

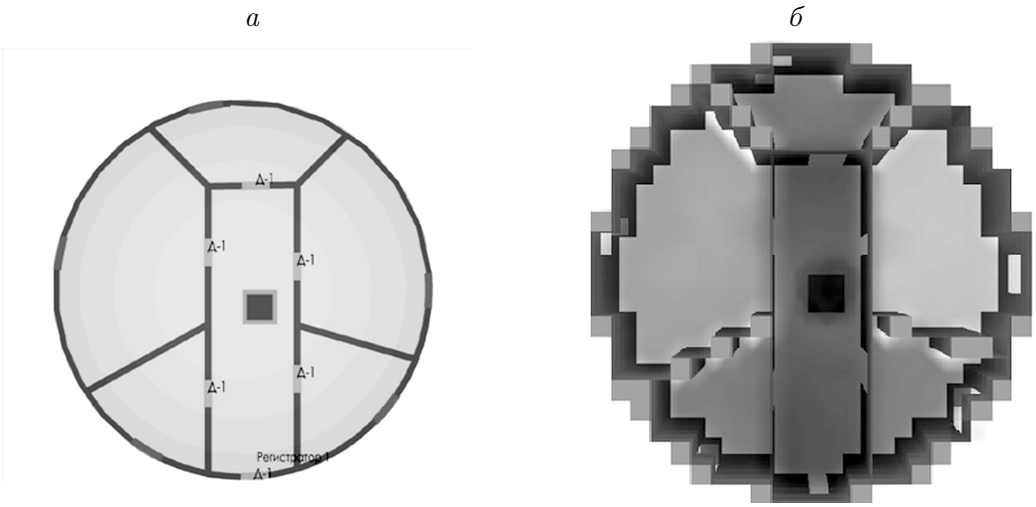

Рис. 1. Вид расчетной области в плане, введенный пользователем (*а*) и ее дискретизированное представление (*б*)

программе “Сигма ПБ”. Этот способ более вычислительноемок, но геометрические размеры расчетной области не изменяются при дискретизации. В этом подходе расчетная область состоит из связанных выпуклых шестигранников (блоков), каждый из которых представляет собой структурированную сетку со своими параметрами, описывающими изменение шага дискретизации в блоке. Связь между блоками осуществляется по граням посредством создания патчей, описывающих взаимное пересечение внешних граней КО смежных блоков. Такой способ дискретизации расчетной области позволяет довольно точно учитывать в расчетах геометрические размеры конструктивных элементов здания, а также использовать неравномерный шаг пространственной дискретизации в расчетной области (рис. 2). Ошибки пользователей в этом случае тоже возможны: сильно неравномерная дискретизация по блокам; излишняя неортогональность, когда, например, прямоугольная расчетная область описывается близкими к треугольным блоками; неравномерное соотношение длин ребер в КО; построение несвязанных блоков. Такие ошибки могут приводить к неустойчивости в расчетах или получению неправильных результатов моделирования.

При решении задач в области пожарной безопасности (в частности, при проведении расчетов по определению расчетной величины пожарного риска) часто возникает вопрос о влиянии размеров элементов объемно-планировочного решения (высота помещения, ширина коридора и проемов, глубина дымовых карманов и т. п.) на распростра-

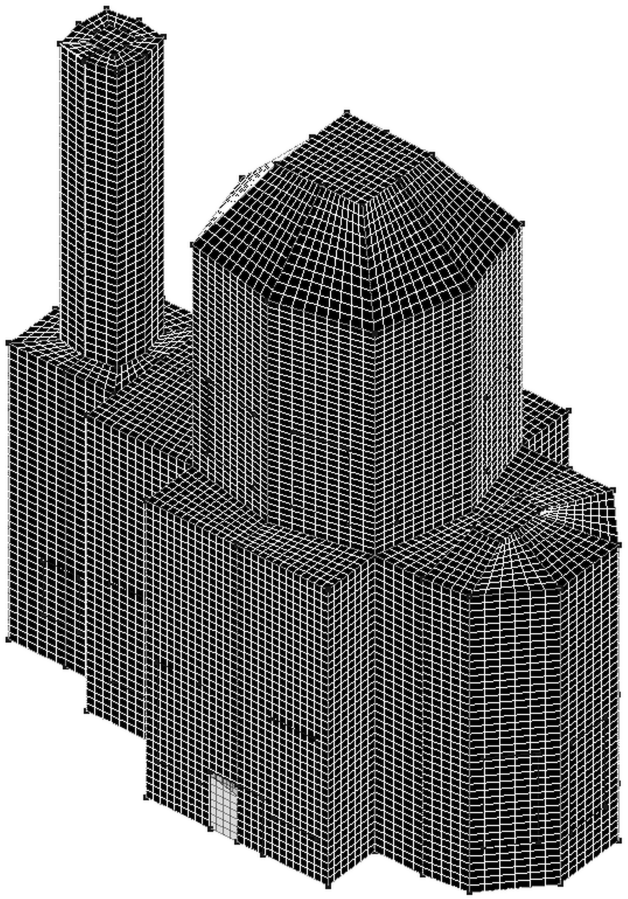

Рис. 2. Дискретизация расчетной области с применением блочно-структурированных сеток

нение опасных факторов пожара, и тогда примененный метод дискретизации расчетной области становится определяющим возможность ответить на возникший вопрос путем сравнения результатов моделирования. Однако ни Методика [1], ни вышедшие впоследствии разъясняющие документы [5] не содержат указаний и рекомендаций на этот счет, в то время как при дискретизации расчетной области необходимо определить допустимые отклонения области для различных геометрических элементов здания.

Задачи моделирования развития пожара характеризуются большими объемами расчетной области (характерный масштаб от десятков до сотен метров) и длительностью моделируемого периода развития пожара (десятки минут). При таких особенностях моделируемого процесса необходимо согласование используемых подмоделей описываемых процессов с дискретизацией расчетной области и шагом по времени. В частности, это касается моделей турбулентности, описывающих пространственные нестационарные турбулентные течения [6].

В программах для расчета величин пожарного риска в РФ чаще всего используются два подхода:

1) упрощенная LES (Large Eddy Simulation) модель Смагоринского, когда для описания движения в ядре потока применяется LES, а вблизи границ расчетной области используются специальные законы стенки;
2) URANS-модели турбулентности (Unsteady Reynolds-averaged Navier — Stokes), в частности в “Сигма ПБ” это SST-модель Ментора [7].

LES-модели чувствительны к пространственной дискретизации вследствие зависимости модельной подсеточной вязкости от размера ячейки. Также отметим, что в LES-моделях решение имеет пульсирующий характер. Для получения “гладкого” решения необходимо проводить дополнительно осреднение с большим шагом по времени. URANS-модели рассчитывают осредненные характеристики потока, они менее чувствительны к разрешению пространства, однако выбор таких моделей может заметно влиять на результат расчета.

Чтобы получить корректный результат моделирования, нужно осмысленно выбирать как непосредственно модель турбулентности, так и пространственно-временную дискретизацию, необходимую для ее использования. В идеале нужно говорить и о проведении серии расчетов на сеточное насыщение численного решения. В то же время практика показывает, что в отсутствие рекомендаций (или четких ограничений) в [1] и при преобладающей низкой квалификации лиц, выполняющих расчеты, определяющим критерием является только скорость расчета, что приводит к использованию грубой дискретизации расчетной области с любой моделью.

Накопленный опыт показывает, что отсутствие явных формулировок в [1] по использованию методов дискретизации, шага дискретизации (соотнесенного с моделью турбулентности и точностью разрешения пространства), составлению расчетной области, заданию граничных условий на ограждающие конструкции здания приводит к неумышленным (по незнанию) или умышленным манипуляциям с постановкой задачи. Приведем примеры (напомним, что целями моделирования являются оценка скорости распространения ОФП на путях эвакуации из здания и определение момента достижения критических значений):

— используются изотермические условия на поверхностях стен всех помещений здания, вошедших в расчетную область, что дает до 80 % потерь тепла через стены вблизи очага пожара и как следствие — снижение скоростей распространения опасных факторов пожара;

— моделирование развития пожара производится при наличии большого числа открытых проемов и окон с начала моделирования, включая помещение с очагом пожара, что может обеспечивать быстрое выветривание продуктов горения и незадымление путей эвакуации;
— помещение с очагом пожара изолируется от остальной расчетной области закрытыми дверями;
— применение декартовых сеток с шагом, большим по сравнению с размером отклонения, при оценке допустимости отступления размеров от требуемых в пожарных нормах;
— расчетную область составляют все помещения здания, что влечет завышение времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара;
— используются грубые сетки, не позволяющие разрешить основную структуру течения и не учитывающие используемые математические подмодели, например турбулентность.

Встречаются расчеты, когда большинство указанных ошибок реализуются одновременно, в этом случае расчеты бессмысленны, а выводы, сделанные на их основе, — некорректны, но законны с точки зрения соответствия действующей редакции Методики. Единственным слабым местом таких расчетов является тот факт, что время блокирования ОФП путей эвакуации, как правило, существенно завышается, а это в свою очередь противоречит главному постулату Методики — рассматривать варианты развития пожара с наихудшими условиями для безопасности людей. Но тогда на проверяющей стороне должен быть грамотный специалист, способный увидеть и обосновать этот, порой единственный, законный повод отклонить (отправить на доработку) расчет, содержащий подобные ошибки. Увидеть ошибки в постановке задачи можно только, если все принятые условия находят отражение в предоставляемом отчете. На текущий момент единая форма отсутствует, необходимый перечень данных в явной форме не прописан.

Кроме указанных проблем численного моделирования развития пожара существует крайне важный вопрос, связанный с использованием базы данных горючей нагрузки [8] для эмпирической модели распространения фронта пламени и выхода продуктов горения, описанной в Методике [1]. Данная модель описывает очаг пожара через постоянные параметры: линейную скорость пламени, удельную скорость выгорания и долю продуктов сгорания в сгоревшем топливе, которые берутся из [8].

Так как база данных разработана во ВНИИПО МВД России более 20 лет назад [8], сегодня существует потребность в ее обновлении, поскольку меняются материалы и условия протекания пожаров и, соответственно, возникают вопросы с ее применимостью в тех или иных ситуациях. Также необходима информация о способе получения параметров горючих нагрузок в базе данных. Эта информация крайне важна: для корректного использования базы данных при формулировании сценариев пожара (в частности, при задании граничных и начальных условий), для расширения базы данных с учетом номенклатуры современных материалов и для совершенствования способов получения параметров горючих нагрузок.

1.2. Моделирование эвакуации

Модели индивидуально-поточного типа позволяют моделировать движение каждого отдельного человека с учетом окружающей обстановки (других людей, препятствий)

в зданиях с какой угодно сложной внутренней инфраструктурой без ограничений на локальную плотность. Можно моделировать следующие явления, свойственные поточному движению: слияние, переформирование (растекание, уплотнение), неодновременность слияния потоков, образование и рассасывание скоплений, обтекание поворотов, движение в помещениях с развитой внутренней планировкой, наличие противотоков и пересекающихся потоков. Размеры и формы проекции людей, скорость свободного движения, направление движения могут задаваться как индивидуально, так и для групп в зависимости от цели моделирования. На каждом расчетном шаге определяется положение каждого человека, как результат — рассчитывается время эвакуации из отдельных помещений и из здания в целом. Именно модели такого типа находят наибольшее развитие и распространение в мировой практике решения задач пожарной безопасности [1, 9, 10].

Проблемы использования индивидуально-поточной модели скорее связаны не с ошибками пользователей, а со слабым представлением модели в Методике, основным аспектам которого уделим внимание.

Как и в случае модели развития пожара, в Методике отсутствуют рекомендации по численной реализации. Разработчики программных продуктов в силу своих компетенций решают эти задачи. Спецификой моделирования эвакуации согласно Методике является регулирование скорости человека локальной плотностью потока (эта зависимость называется фундаментальной диаграммой [11]). Положение каждого отдельного человека в момент времени определяется через предыдущее с учетом возможного сдвига за текущий расчетный шаг. Величина сдвига определяется по аналитической зависимости скаляра скорости от локальной плотности.

Как следствие, встает вопрос о методах оценивания локальной плотности людского потока (при этом преимущественно представляет интерес плотность по направлению движения), выборе длины расчетного шага и способах определения направления движения в каждый расчетный шаг, которые либо вообще не находят отражения в Методике, либо в ней прописан не лучший вариант. Так, предложенный способ оценивания плотности через отношение количества человек на участке к площади участка (участки имеют разную площадь) дает устойчивую оценку плотности на последующих расчетных шагах только в определенных геометрических случаях для установившихся потоков выше средней плотности. В иных случаях, особенно на границах участков, оценка носит флуктуирующий характер, что выражается в “рваном” решении, некорректной интенсивности потока, и, как следствие, сказывается на качестве оценки времени эвакуации.

Задача моделирования движения человека решается в плоскости, и считается, что человек представляется плоским жестким несжимаемым диском с фиксированной площадью проекции. Это не позволяет моделировать физическое взаимодействие, присущее людям при движении в потоках с высокой плотностью и выраженное в уменьшении фактической площади проекции. Натурные данные [10, 11] показывают, что медленное движение может происходить и при 10–12 чел./м^2, в то время как, например, при площади проекции 0.125 м^2 верхняя оценка максимального количества людей на 1 м^2 равна 8, а если учитывать форму проекции, то это 6 чел./м^2. В результате происходит сильное занижение величины моделируемого потока через сечение в сравнении с данными натурных экспериментов [12]. Но рабочими плотностями потока в задачах моделирования эвакуации, как правило, являются плотности 2–3 чел./м^2, и здесь можно достичь хорошего соответствия натурным данным. На участках с заторами, где движения нет или оно осуществляется с очень низкой скоростью, эта проблема выражена в большей

площади пространства, занимаемого массой скопившихся людей, однако на оценивании времени эвакуации это сказывается в меньшей степени.

1.3. Сопоставление результатов моделирования развития пожара и эвакуации

Логика и назначение процедуры сопоставления результатов моделирования развития пожара и эвакуации подсказывают, что времена эвакуации и блокирования путей эвакуации должны определяться по всему пути следования людей наружу из помещений и из здания в целом. Границами участков (контрольными точками) должны быть как минимум все помещения, где в начальный момент находились люди, а также проемы, связывающие соседние помещения, и выходы на лестничные клетки и наружу из здания, расположенные по пути следования людей в рассматриваемом сценарии. В этом случае проведенный анализ можно считать отвечающим целям проведения расчетов. Однако в Методике нет четких указаний, где производить сравнительный анализ полученных данных моделирования. Лишь добросовестный совокупный анализ достаточно большого количества пунктов документа позволяет сформулировать представленный здесь подход. Это приводит к тому, что некоторые расчетчики манипулируют выбором точек контроля для демонстрации только удобных результатов, например расставляют контрольные точки только на выходах из здания (где предельно-допустимые значения не достигаются), в то время как люди могут по пути к выходу попасть в опасные, согласно Методике, условия.

Другим важным вопросом для полевых моделей является собственно способ получения величины времени блокирования эвакуационного пути (по Методике это выходы из помещений — проемы) по любому из семи рассматриваемых опасных факторов пожара (концентрации CO, CO_2, O_2, HCl, температура, тепловой поток, видимость (оптическая плотность)). При полевом моделировании блокирование проемов можно определять разными способами, например: контрольная точка (или их набор) вблизи проема, контрольный отрезок или контрольная окрестность. Причем в случае контрольных отрезка и окрестности условие блокирования может наступать в зависимости от доли их покрытия критическим значением ОФП. Таким образом, способ определения времени блокирования может существенно влиять на саму величину времени блокирования.

В то же время наиболее естественный вариант определения времени блокирования людей при эвакуации — совмещение координат людей и горизонтальных срезов полей ОФП, а также анализ их пространственно-временного пересечения во всем объеме здания [13]. Этот способ дает полную статистику о местах попадания людей в область, где ОФП достигли критических значений, и длительности пребывания людей в ней, он является наиболее адекватным и облегчает анализ полученных результатов.

2. Особенности использования зарубежных программ

Основная проблема при использовании зарубежных программ связана не с математическими моделями или их возможностями, а с их адаптацией (или отсутствием таковой) для расчетов величин пожарного риска в соответствии с Методикой.

В России наиболее распространенной зарубежной программой, применяемой для моделирования развития пожара на основе полевого метода, является бесплатная программа FDS (NIST, США [14]), которая используется со сторонними платными оболоч-

ками для ввода данных. При грамотной настройке различных параметров FDS позволяет качественно проводить численное моделирование развития пожара с использованием упрощенной эмпирической модели горения для описания очага пожара в соответствии с [1]. При определении дальности видимости S в FDS используется формула (16.8) из [14] $S = C/K$, где K — коэффициент затухания света (является аналогом оптической плотности дыма μ, используемой в [1]), C — безразмерная константа, которая по умолчанию равна 3 (для светоотражающих сред). В то же время в [1] используется константа 2.38. Отсутствие должной настройки этого параметра автоматически дает ошибку в 20 % при определении времени блокирования по задымлению (дальности видимости).

В отечественной практике моделирования развития пожара [1, 8] горючая нагрузка описывается продуктами выхода (в килограммах) на килограмм твердого топлива (газами CO, CO_2, HCl), потреблением O_2 (L_{O_2}, кг/кг), коэффициентом дымообразования D_m [Нп $\cdot$ м^2/кг], скоростью выгорания ψ [кг/м^2/с], тепловыделением H_f [кДж/кг]. В FDS горючая нагрузка [5, 8] моделируется посредством введения эквивалентного газового топлива.

Для применения FDS при моделировании развития пожара в расчетах пожарного риска частной организацией были выпущены рекомендации [15], получившие повсеместное применение, в которых, в частности, приводятся пересчитанные данные отечественных горючих нагрузок во входные данные FDS. Пересчет параметров производился из условия эквивалентности скорости выгорания горючей нагрузки, рассматриваемой согласно Методике, и скорости выхода горючего газа в FDS. В пересчитанных данных такие параметры, как скорость выгорания ψ [кг/м^2/с] и тепловыделение H_f [кДж/кг], представлены только через удельную мощность $Q_{\text{уд}} = H_f \psi \eta$ [кВт/м^2] ($\eta = 0.93$ — коэффициент полноты горения). Однако для обеспечения необходимого количества выделяемых продуктов сгорания (ОФП), как того требует Методика, необходимо задать еще один параметр, который бы определял расход горючего газа. Но этот параметр не определяют [15], и в этом случае в FDS используется параметр, описывающий теплоту сгорания топлива в зависимости от массы потребляемого кислорода со значением по умолчанию. Это приводит к тому, что правильно определяется количество выделяющегося тепла, но ошибочно масса продуктов сгорания. Позднее в другом методическом пособии [16] данная ошибка была исправлена, однако часть расчетов по-прежнему проводится согласно рекомендациям [15].

Следует отметить, что в FDS на внутренних границах по умолчанию заданы изотермические условия, которые подавляющим количеством пользователей не изменяются, а это дает до 80 % потерь тепла через стены вблизи очага пожара и приводит к существенному снижению интенсивности конвекции и скорости распространения ОФП.

Для моделирования эвакуации используется программа Pathfinder (Thunderhead Engineering, США [17, 18]). Спецификой моделирования эвакуации согласно Методике является регулирование скорости человека локальной плотностью потока, выраженной конкретной формулой и коэффициентами [1]). По умолчанию в Pathfinder реализована зависимость SFPE [10], которая имеет существенные отличия: скорость потока равна нулю при плотности 4 чел./м^2. К тому же понятие “скопление” определено через скорость потока, а не через плотность, как того требует Методика. Поэтому в случае использования программы для моделирования эвакуации и определения времени эвакуации при расчетах в соответствии с Методикой требуется соответствующая локализация и адаптация программы.

3. Программный комплекс “Сигма ПБ”

С 2010 г. началась совместная работа сотрудников Красноярского филиала Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и Института вычислительного моделирования СО РАН по созданию программного инструмента, позволяющего моделировать распространение опасных факторов пожара с применением полевой модели и эвакуацию людей по индивидуально-поточной модели из зданий на основе Методики. Результатом данного исследования явился специализированный программный комплекс “Сигма ПБ” [19], разработанный для решения задачи определения вероятности эвакуации людей из здания и расчетных величин пожарного риска в соответствии с [1]. Программный комплекс “Сигма ПБ” содержит все необходимые программные модули для проведения расчетов величин пожарного риска: построитель расчетных областей для моделирования развития пожаров и эвакуации, расчетные модули, модуль совместного анализа результатов расчетов распространения опасных факторов пожара и эвакуации, а также автоматический генератор отчетов (рис. 3).

Расчетные инструменты (методы, модели, алгоритмы) выбраны с учетом потребностей, возникающих при решении задач в области пожарной безопасности с помощью расчета пожарного риска: спектр задач, точность учета размеров отдельных элементов (объемов) здания, учет элементов систем противодымной защиты, низкие требования к вычислительным ресурсам.

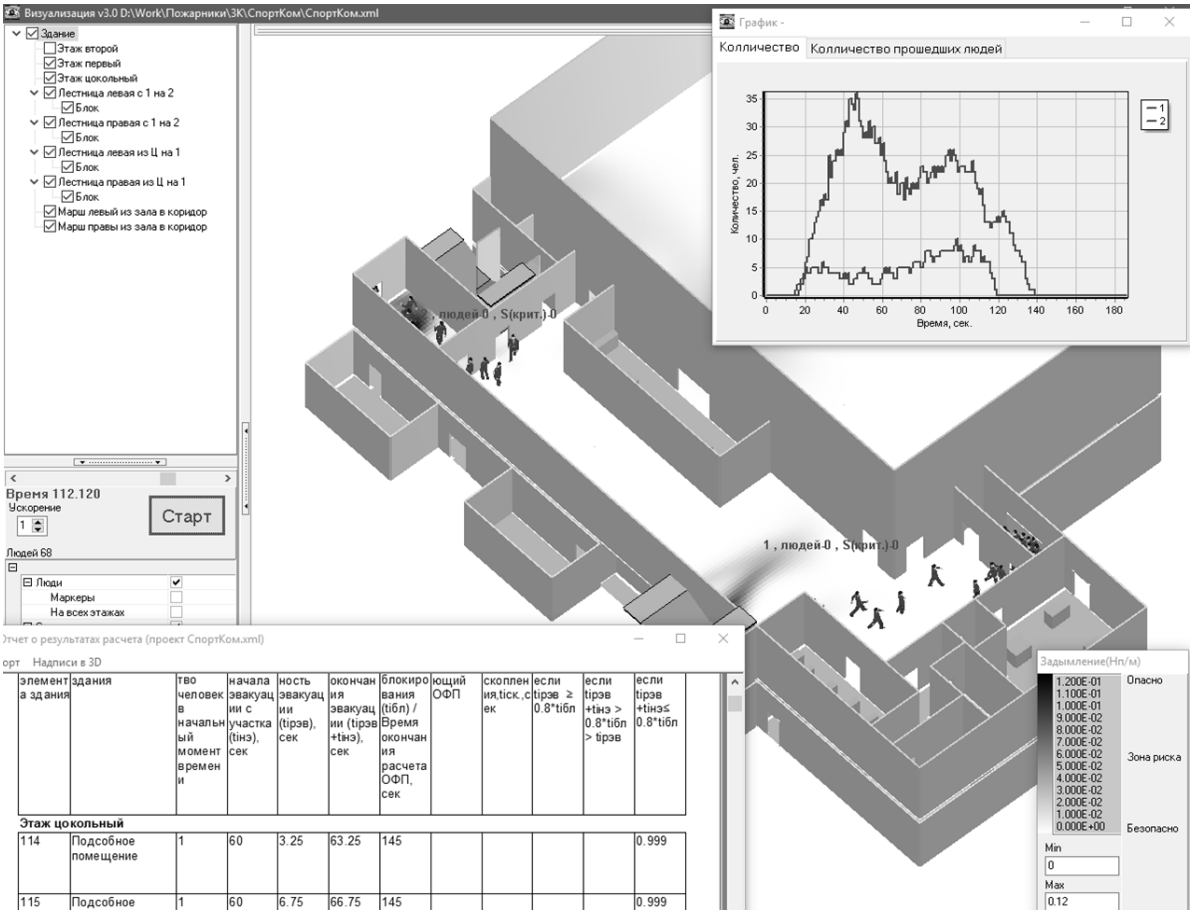

Рис. 3. Программный комплекс “Сигма ПБ”. Модуль анализа результатов расчетов

Так, в расчетном ядре SigmaFire, реализующем CFD-модель развития пожара, для моделирования турбулентности используются экономичные URANS-модели [7]. Связь между полями скорости и давления реализуется при помощи эффективной SIMPLE-подобной процедуры расщепления [20]. Используется эмпирическая модель распространения фронта пламени и выхода продуктов горения (развития очага пожара), описанная в Методике.

Для расчетов использованы неортогональные многоблочные структурированные сетки. Реализованы инструменты, позволяющие проводить визуальный контроль и анализ расчетных сеток, тем самым формируя культуру корректного применения численного моделирования в решении задач в области пожарной безопасности. В планах — разработка инструментов, позволяющих минимизировать влияние пользователя на качество построения сетки, — автоматизированное построение сеток с анализом расчетной области.

Для моделирования движения людей во время эвакуации в составе программного комплекса "Сигма ПБ" реализована модель индивидуально-поточного типа на основе расчетного ядра SigmaEva, разработанного в ИВМ СО РАН [21]. Люди представляются в виде плоских круглых несжимаемых дисков. В начальный момент времени их положение задается координатами центров дисков $\mathbf{x}_i(0) = (\mathbf{x}_i^1(0),\ \mathbf{x}_i^2(0))$, $i = \overline{1, N}$, N — количество. Скорость свободного движения, площадь проекции частицы, другие параметры модели могут задаваться индивидуально для каждой частицы или быть одинаковыми для всех. Каждому человеку i задается цель движения и приписывается поле расстояний S_i^k. В каждый момент времени t рассчитываются направление движения, локальная плотность и определяется скорость согласно [1], разрешаются коллизии, если они возникают.

Оба расчета (моделирование эвакуации и распространения ОФП) выполняются на базе единожды созданной модели здания. Единый формат исходных данных позволил автоматизировать задание контрольных точек — это все проемы, через которые проходят люди во время эвакуации, и за определением таковых следит сама программа. Как следствие, процедура совместного анализа результатов обоих расчетов, определения вероятности эвакуации и формирования итоговых отчетов по результатам расчетов реализована автоматически, тем самым ускоряется работа в программе в целом, исключаются случайные ошибки и человеческий фактор. Реализована совместная визуализация результатов расчетов.

Заключение

Целью статьи было поднять проблематику корректного применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска. В связи с описанной ситуацией, по мнению авторов статьи, необходимы следующие меры:

— разработка стандартизированной формы отчета с конкретизацией требований к составу информации и способу представления;

— конкретизация Методики в части описания требований к полевой модели (допустимая точность учета геометрических размеров элементов зданий в расчетах, точность дискретизации расчетной области, допустимые граничные условия на внутренних и внешних границах и т. д.) и индивидуально-поточной модели (оценивание локальной плотности, выбор длины расчетного шага, изменение площади

проекции с увеличением плотности), анализ результатов расчетов (выбор и определение времени блокирования контрольных точек);
- описание методологии проведения численного моделирования развития пожара и эвакуации;
- разработка программы по повышению компетенций специалистов, выполняющих и проверяющих/принимающих расчеты.

Следствием этих мер ожидается постепенное искоренение некачественных расчетов, повышение уровня культуры и эффективного применения численных методов и риск-ориентированного подхода в целом в решении задач в области обеспечения пожарной безопасности.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 17-41-240947 и в рамках государственного задания ИТ СО РАН и ИВМ СО РАН.

Список литературы / References

[1] Приложение к Приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382 “Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности” (в ред. приказа МЧС России от 12.12.2011 № 749). Адрес доступа: `http://www.mchs.gov.ru/law/Normativno_pravovie_akti_Ministerstva/item/5380580/`
Fire risk code for buildings. EMERCOM of Russia. 2009. Available at: `http://www.mchs.gov.ru/law/Normativno_pravovie_akti_Ministerstva/item/5380580/` (In Russ.)

[2] **Guan, H.Y., Kwok, K.Y.** Computational fluid dynamics in fire engineering — theory, modelling and practice. Butterworth-Heinemann: Elsevier Sci. and Technology, 2009. 530 p.

[3] **Grandison, A.J., Galea, E.R., Patel, M.K.** Fire modelling standards/benchmark: Report on Phase 1 Simulations. FireSafety Engineering Group. London: Univ. of Greenwich, Fire Safety Engineering Group, 2001. 125 p.

[4] **Hurley, M.J.** SFPE handbook of fire protection engineering. 5th edition. New York; Heidelberg; Dordrecht; London: Springer, 2016. 3493 p.

[5] Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Пособие по применению / А.А. Абашкин А.В. Карпов, Д.В. Ушаков и др. М.: ВНИИПО, 2014. 83 с.
Application guide of fire hazard risk code for buildings / A.A. Abashkin, A.V. Karpov, D.V. Ushakov et al. Moscow: VNIIPO, 2014. 83 p. (In Russ.)

[6] **Launder, B.E., Spalding, D.B.** Mathematical model of turbulence, London: Acad. Press, 1972. 169 p.

[7] **Menter, F.R.** Two-equation Eddy-Viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32(8). P. 1598–1605.

[8] **Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. пособие. М.: Акад. ГПС МВД России, 2000. 120 с.
Koshmarov, Yu.A. Prediction of indoor fire hazards: Study guide. Moscow.: Acad. GPS MVD Rossii, 2000. 120 p. (In Russ.)

[9] **Hanea, D.M.** Human risk of fire: Building a decision support tool using Bayesian networks. Wohrmann Print Service, 2009. 227 p.

[10] **Schadschneider, A., Klingsch, W., Kluepfel, H. et al.** Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications // Encyclopedia of Complexity and System Science. Springer, 2009. Vol. 5. P. 3142–3176.

[11] **Kholshevnikov, V.** Forecast of human behavior during fire evacuation // Proc. of the Intern. Conf. "Emergency evacuation of people from buildings — EMEVAC". Warsaw: Belstudio, 2011. P. 139–153.

[12] **Кирик Е.С., Малышев А.В.** Тестирование компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // Пожарная безопасность. 2014. № 1. С. 78–85.
Kirik, E.S., Malyshev, A.V. Testing of computer programmes for calculation of evacuation time by the example of SigmaEva module // Fire Safety. 2014. No. 1. P. 78–85. (In Russ.)

[13] **Кирик Е.С., Юргельян Т.Е., Малышев А.В. и др.** О формализации реакции человека на пожар и интеграция моделей эвакуации и развития ОФП // Пробл. безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 3. С. 59–68.
Kirik, E.S., Yurgel'yan, T.E., Malyshev, A.V. et al. On the formalization of the reaction of humans on fire and the integration of models of evacuation and development of fire spreading models // Safety and Emergencies Problems. 2011. No. 3. P. 59–68. (In Russ.)

[14] Fire dynamics simulator user's guide / K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott et al. National Institute of Standards and Technology, 2019. 288 p. Available at: `https://www.thunderheadeng.com/wpcontent/uploads/2013/08/FDS_User_Guide.pdf`

[15] **Карькин И.Н., Контарь Н.А., Грачев В.Ю.** СИТИС 4-11. Рекомендации по использованию программы FDS с применением PyroSim 2010-2 и SmokeView 2011. `http://fds.sitis.ru/forum/download.php?id=13` (дата обращения 30.01.2019).
Kar'kin, I.N., Kontar', N.A., Grachev, V.Yu. Sitis 4-11. FDS guide with PyroSim 2010-2 и SmokeView 2011. Available at: `http://fds.sitis.ru/forum/download.php?id=13` (accessed 30.01.2019). (In Russ.)

[16] **Карькин И.Н.** Работа в программном комплексе FireCat. `https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf` (дата обращения 30.01.2019).
Kar'kin, I.N. Work in the FireCat software package. Available at: `https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf` (accessed 30.01.2019). (In Russ.)

[17] Pathfinder Verification and Validation 2015.1 / Thunderhead Engineering, 2015. 67 p. Available at: `https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/resources/`

[18] Pathfinder Technical Reference / Thunderhead Engineering, 2018. 73 p. Available at: `https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/resources/`

[19] **Литвинцев К.Ю., Кирик Е.С., Дектерев А.А. и др.** Расчетно-аналитический программный комплекс "Сигма ПБ" по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 51–59.
Litvintsev, K.Yu., Kirik, E.S., Dekterev, A.A. et al. Design-Computational and analytical program complex "SIGMA PB" for modelling of fire development and evacuation // Fire Safety. 2016. No. 4. P. 51–59. (In Russ.)

[20] **Patankar, S.V.** Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1980. 197 p.

[21] **Kirik, E., Malyshev, A., Senashova, M.Yu.** On the evacuation module SigmaEva based on a discrete-continuous pedestrian dynamics model // Proc. of the 11th Intern. Conf. "Parallel Processing and Applied Mathematics". Lecture Notes in Computer Science, 2016. Vol. 9574. P. 539–549.

Поступила в редакцию 6 ноября 2018 г.,
с доработки — 22 февраля 2019 г.

Problems of application of numerical simulations for fire risks assessment

Litvintsev, Kirill Yu.[1,*], Kirik, Ekaterina S.[2], Yagodka, Evgeniy S.[3]

[1]S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia
[2]Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia
[3]The State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, 129366, Russia
[*]Corresponding author: Litvintsev, Kirill Yu., e-mail: sttupick@yandex.ru

In Russia, a fire hazard assessment using numerical modelling of fire and evacuation development is carried out according to the Methodology for determining fire risk calculated values issued by the EMERCOM of Russia in 2009. The Krasnoyarsk Branch of IT SB RAS and ICM SB RAS have developed a software tool to simulate the spread of dangerous fire factors and the evacuation of people in buildings. The result of this work is the "Sigma PB" software package. "Sigma PB" is adapted to calculate fire risk and to implement fire safety training programs (simulators).

The development of the software, many years of experience and observation of other software packages combined with the analysis of the Fire Code and methodical literature developed by the EMERCOM of Russia, allow us drawing the following conclusions: there were problems associated with the low level of regulatory documentation governing the use of knowledge-intensive calculation methods, and the lack of a training system for specialists to conduct and verify such calculations.

The article reveals some aspects of the problem, namely the use of numerical modelling of the development of fire and evacuation.

Keywords: evacuation, fire, numerical simulation, fire risk.

Cite: Litvintsev, K.Yu., Kirik, E.S., Yagodka, E.S. Problems of application of numerical simulations for fire risks assessment // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 4. P. 56–69. (In Russ.) DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.005.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Region Science and Technology Support Fund to the research project № 17-41-240947 and was carried out under state contract with IT SB RAS and ICM SB RAS.

Received 6 November 2018
Received in revised form 22 February 2019

© ICT SB RAS, 2019