

Компьютерное моделирование развития пожара и эвакуации в парадигме BIM

Computer modeling of fire and evacuation in the paradigm of BIM

Е.С. Кирик

канд. физ.-мат. наук
Институт вычислительного
моделирования СО РАН,
ООО «Зк-эксперт»

kirik@icm.krasn.ru

E.S. Kirik

Candidate of Physico-
Mathematical Sciences
Institute of Computational
Modelling, Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences

Аннотация:

Рассмотрено применение моделирования развития пожара и эвакуации в контексте современных редакций ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и Приказа 382 МЧС РФ от 30.06.2009 г. Представлен инструмент для выполнения компьютерного моделирования развития пожара и эвакуации, реализующий BIM-парадигму.

Ключевые слова: BIM-моделирование зданий, моделирование развития пожара, моделирование эвакуации, пожарная безопасность.

Abstract:

Application of modeling of development of the fire and evacuation in the context of modern editions FZ-123 «Technical regulations about requirements of fire safety» and the Order of 382 Ministries of Emergency Situations of the Russian Federation from 6/30/2009 is considered. The tool for performance of computer modeling of development of the fire and evacuation realizing a BIM paradigm is presented.

Key words: BIM modeling of buildings, fire development modeling, evacuation modeling, fire safety.

Введение

Расчёт пожарного риска и BIM. С 2009 г в результате принятия Технического регламента о требованиях пожарной безопасности (123-ФЗ от 22.07.2008) в России начал формироваться институт независимой оценки пожарного риска. Для реализации Техрегламента были изданы подзаконные акты. Постановление Правительства РФ от 31 марта 2009 г. № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска» в области обеспечения пожарной безопасности ввело понятие расчета пожарных рисков при составлении декларации пожарной безопасности. Постановлением от 7 апреля 2009 г. N 304 «Об утверждении Правил оценки соответствия объектов защиты (продукции) установленным требованиям пожарной безопасности путем независимой оценки пожарного риска» было введено понятие независимой оценки пожарного риска. Для реализации постановления №272 и №304 была разработана и утверждена приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382 «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (далее - Методика), [1].

Одним из результатов применения рискоориентированного подхода к оценке пожарной опасности объекта является снижение стоимости проекта (реконструкции) за счет возможности отступлений в проекте (объекте) от требований нормативных документов (Сводов правил) по пожарной безопасности. Подтверждение пожаробезопасности решения производит-

ся путем расчета величины пожарного риска. Если рассчитанная величина пожарного риска не превосходит установленное Техрегламентом критическое значение (10⁻⁶ в год), тогда отступления в проекте (на объекте) считаются допустимыми.

Основные расчетные действия, предписанные Методикой, это определение времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара – ОФП (достигается за счет моделирования развития пожара), и определение времен эвакуации людей из отдельных частей здания и здания в целом (достигается путем моделирования эвакуации). На основе этих расчетов определяется вероятность эвакуации из здания, и далее собственно величина пожарного риска. Специфика моделей и сложность решаемых задач таковы, что применение моделирования для определения времен эвакуации и блокирования ОФП путей эвакуации возможно только с применением компьютера, а для этого требуются вычислительные способы представления моделей и соответствующие численные алгоритмы. В Методике модели представлены в математической постановке. В тоже время численная и программная реализации любой из моделей не тривиальная задача и является предметом специализированного профессионального труда.

С точки зрения внедрения в повсеместную практику проектирования рискоориентированного подхода не менее важным аспектом является удобство использования компьютерных программ по расчету пожарного риска. Наиболее трудоемким этапом является построение трехмерной модели объекта, которая затем используется как расчетная область для моделирования эвакуации и развития пожара.

Для существующих зданий в большинстве своем приходится «поднимать» трехмерную модель вручную по бумажным планам средствами строителей программ, или сторонними программами и затем импортировать в расчетную программу.

На этапе проектирования дела обстоят намного более оптимистично, если проектирование ведется в BIM-ориентированной программе (BIM – building information model – информационная модель здания). Продуктом BIM-программы проектирования являются не просто графические объекты (чертежи), а трехмерная информационная модель здания, которая в цифровом виде содержит всю информацию, необходимую для выполнения расчета пожарного риска, а именно: объемно-планировочное решение, расположение инженерных элементов системы противопожарной защиты. Прямо в программе, где происходит проектирование, выполнить расчет не представляется возможным, отсут-

ствует соответствующая функция как встроенная. На сегодняшний день можно использовать только сторонние расчетные программы для этих целей. И наличие именно в цифровом виде 3D-модели здания и инженерных систем противопожарной защиты, создаваемых на этапе проектирования, дает принципиальную возможность использовать эту информацию для создания расчетных областей, минуя этап построения модели в расчетной программе. А этот факт является существенным ускорением в проведении этапа подготовки данных для выполнения расчетов по моделированию эвакуации и развития пожара. Правильно созданная BIM-модель здания содержит информацию о здании уже в нужном структурированном виде, т.е. здание состоит из лестниц и этажей, этажи из помещений, помещения из стен его образующих. Такую же структуру хранения информации о здании имеет расчетная программа. Структурирование информации о здании имеет существенное значение в при расчете эвакуации и анализе результатов расчетов. Остается дело за малым – необходимо передать эту информацию в расчетную программу в понятном ей формате. Для этого создаются специальные программы-конвертеры, которые цифровую информацию, представленную в одном виде в BIM-программе проектирования, фильтруют, извлекают только нужную информацию для проведения расчета и представляют ее в формате, понятном расчетной программе. Так на рис. В1 представлена модель здания, выполненная в программе Revit, на рис. В2 – модель того же здания, импортированная в расчетную программу «Сигма ПБ» (<http://3ksigma.ru>).

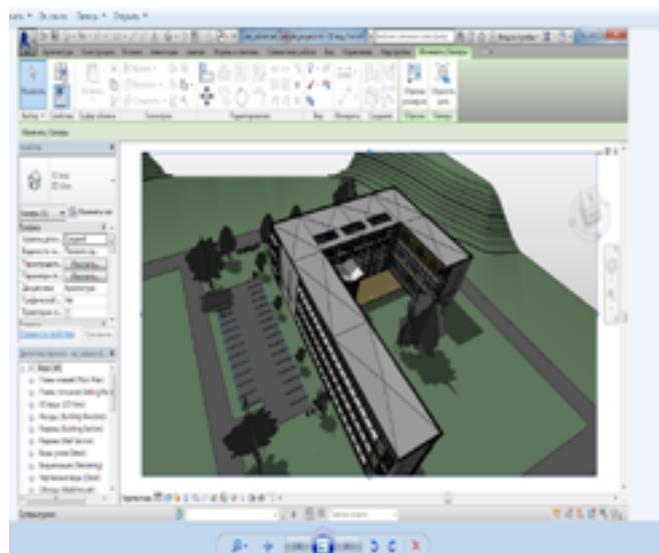


Рис. В1. 3D-модель здания, созданная в Revit

Из оригинальной информационной 3D-модели здания специальной программой-конвертером, ко-

торая является встраиваемой в Revit (plug-in), в автоматическом режиме была извлечена только существенная для выполнения расчета информация об объемно планировочном решении. Если проект содержит информацию об инженерных системах противопожарной защиты, то и эта информация может быть извлечена из оригинального проекта с тем, чтобы при выполнении расчета по моделированию развития пожара учесть работу этих систем. Конечно, любой автоматический импорт данных требует ручной «доводки», поскольку вмешивается, так называемый, человеческий фактор. И чем больше проект здания соответствует канонам создания BIM-модели, тем меньше таких ручных действий требуется.

Далее рассмотрим вопросы, связанные с формулировкой сценария развития пожара и эвакуации, выполнения соответствующего расчета и анализа результатов расчета.

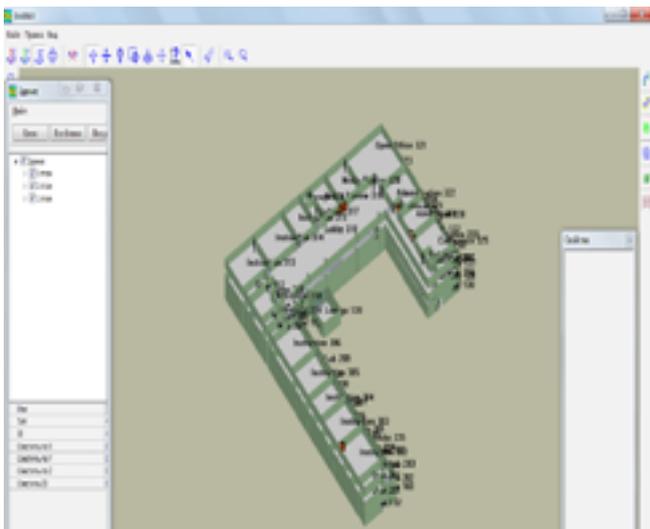


Рис. В2. 3D-модель здания, импортированная в расчетную программу

Выполнение расчета развития пожара и эвакуации в компьютерном программном комплексе «Сигма ПБ». Приведем пример расчета вероятности эвакуации для одного сценария в офисном здании, на котором в 2013 году проводилась апробация программного комплекса «Сигма ПБ» совместно с ГУ МЧС России по Красноярскому краю.

Программный комплекс «Сигма ПБ» предназначен для выполнения расчетов величины пожарного риска в многоэтажных зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности.

Программный комплекс имеет компоненты:

- построитель трехмерной модели здания (используется как самостоятельный инструмент

или для доведения и редактирования импортированной модели здания из Revit);

- редактор сценариев пожара;
- редактор сценариев эвакуации;
- модуль, реализующий расчет развития пожара;
- модуль, реализующий расчет эвакуации людей;
- модуль 3D-визуализации, анализа результатов расчета, определения вероятности эвакуации, формирования отчетов по входным данным и результатам расчета;
- модуль расчета величины пожарного риска.

Для выполнения расчетов распространения опасных факторов пожара (ОФП) и эвакуации используются вычислительные ядра отечественных программ SigmaFire © [2, 3, 4] и SigmaEva © [5, 6] соответственно, в которых реализованы полевая модель пожара и модель эвакуации индивидуально-поточного типа [1].

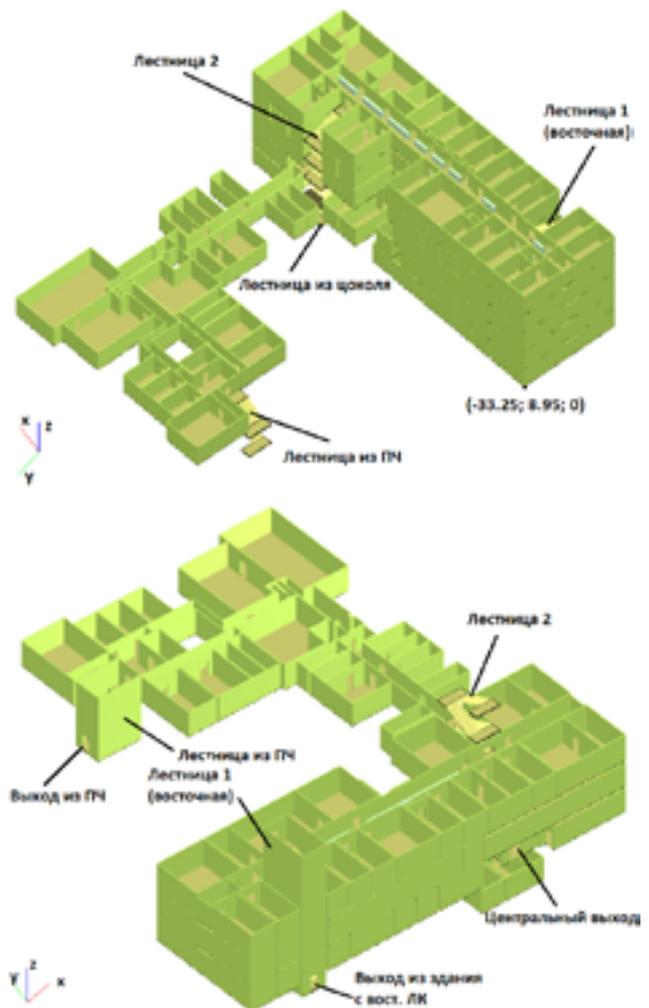


Рис. 1. 3D-модель здания. Вид 1 (слева), вид 2 (справа)

Перейдем к описанию здания и затем составленного сценария. Здание можно разделить на две

части, рис. 1: основная (пятиэтажное здание с цокольным этажом) и пристройка (ПЧ) в один этаж на уровне второго этажа основного здания. Основное здание содержит две лестницы, одна из которых не является эвакуационной (Лестница 2) – не отделена перегородкой от лестницы, ведущей из подвального (цокольного) этажа. В пристройке имеется одна лестничная клетка (Лестница из ПЧ). Обе части здания соединены открытым проходом через неэвакуационную лестничную клетку на уровне второго этажа основного здания. Неэвакуационная лестничная клетка (Лестница 2 + Лестница из цоколя) имеет свободный выход на цокольный этаж. Доводчики на дверях, соединяющих коридоры на этажах (за исключением первого этажа) с лестничными клетками (Лестница 1(восточная), Лестница 2, Лестница из цоколя), не функционируют. Особенности данного здания являются: отсутствие СОУЭ, системы дымоудаления; имеется единственная задымляемая эвакуационная лестница (Лестница 1(восточная)).

В 3D-модель здания были включены только элементы, существенные для расчета эвакуации и пространства ОФП.

Рассматривался сценарий развития пожара, рис. 2: на цокольном этаже в складском помещении. Выбор обусловлен нахождением большого количества пожарной нагрузки (бумага и мебель), отсутствием противопожарной двери, низкой вероятностью обнаружения пожара на ранней стадии, свободным доступом ОФП с цокольного этажа через неэвакуационную лестничную клетку основного здания на верхние этажи (начиная со второго) и в пристройку.

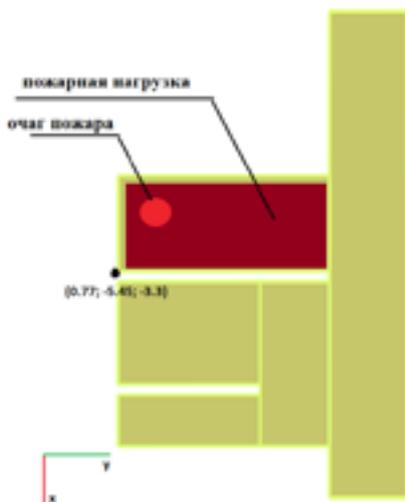


Рис. 2. Схема расположения пожарной нагрузки и очага пожара. Цокольный этаж

Для создания более худших условий (более быстрого задымления) расчетная область была ограничена помещением очага пожара и эвакуацион-

ными путями (коридоры на всех этажах, включая пристройку, вестибюль первого этажа, лестничные клетки), рис. 3. Двери, ведущие на обе лестничные клетки с этажей при расчете принимались открытыми.

Сценарий эвакуации: количество людей соответствует максимальной загрузке здания (451 человек), расположение по зданию – в соответствии с распределением по рабочим местам, задержка начала эвакуации относительно начала пожара составляет 360 секунд ввиду отсутствия систем оповещения и управления эвакуацией людей. Физические характеристики были заданы для всех одинаковым образом: скорость свободного движения для всех людей – нормально распределенная случайная величина с математическим ожиданием 1,66 м/с и среднеквадратичным отклонением 0,083 м/с, площадь проекции 0,125 м². В качестве единственного пути для эвакуации со всех этажей, кроме цокольного, рассматривалась Лестница 1 (восточная), выход из здания «Выход из здания с восточной ЛК». На цокольном этаже также предполагалось размещение людей в количестве 3 человек. В силу непосредственной близости к очагу пожара задержка начала движения для них принималась 30 сек. от начала пожара, путь на Центральный выход по «Лестнице из цоколя».

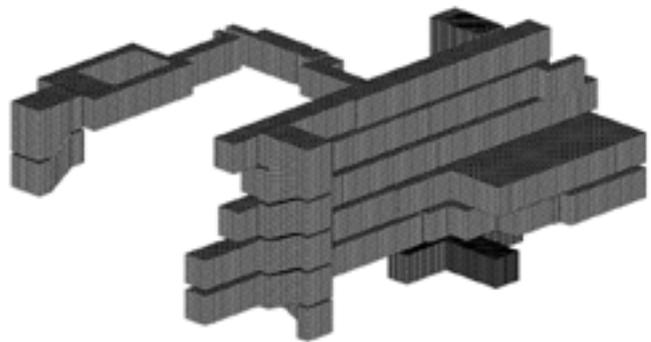


Рис. 3. Расчетная сетка для расчета распространения ОФП

Анализ расчетов. (На представленных ниже рисунках зоны, обозначенные красным цветом, – области, в которых значения ОФП на высоте 1.7 м от пола достигли предельно допустимых значений. Поля ОФП отображаются только на горизонтальных участках расчетной области, на лестницах – только на площадках, примыкающих непосредственно к этажам.) При развитии пожара, как правило, наиболее быстро распространяется дым, и первой происходит блокировка по условию ограниченной видимости (или оптической плотности). Как видно из рис. 4 ко времени начала эвакуации полностью задымлен коридор пятого этажа и частично четвертого. Люди покидают 5 и 4 этажи только к 403 и 416

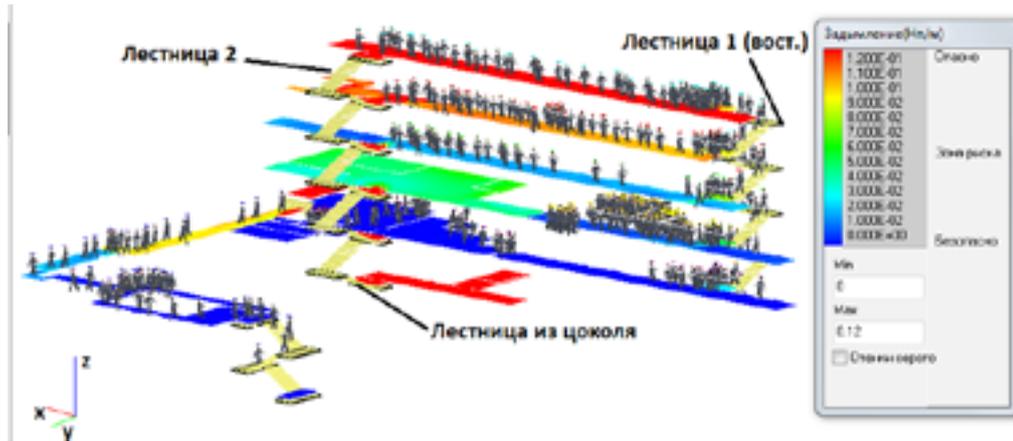


Рис. 4. Поле оптической плотности на 375 сек., Hn/m , на всех этажах здания

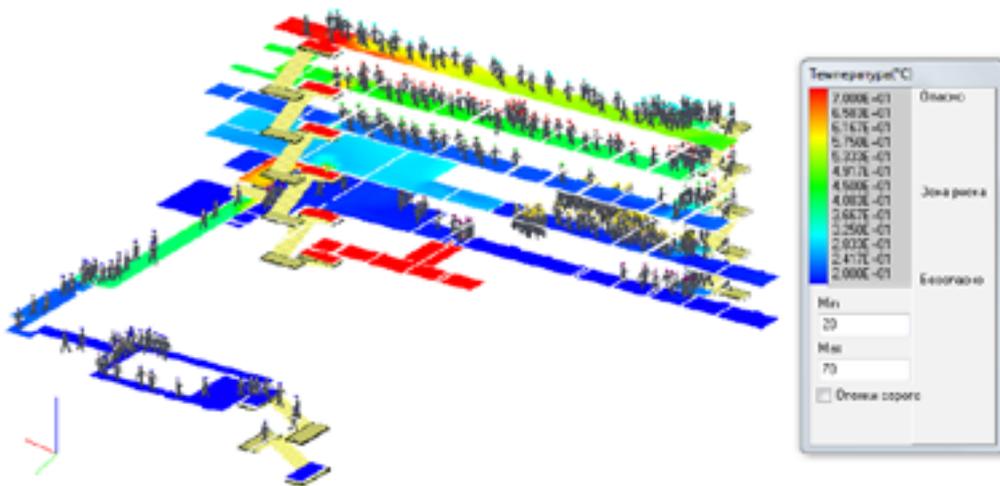


Рис. 5. Поле температуры на 375 сек., градусы Цельсия

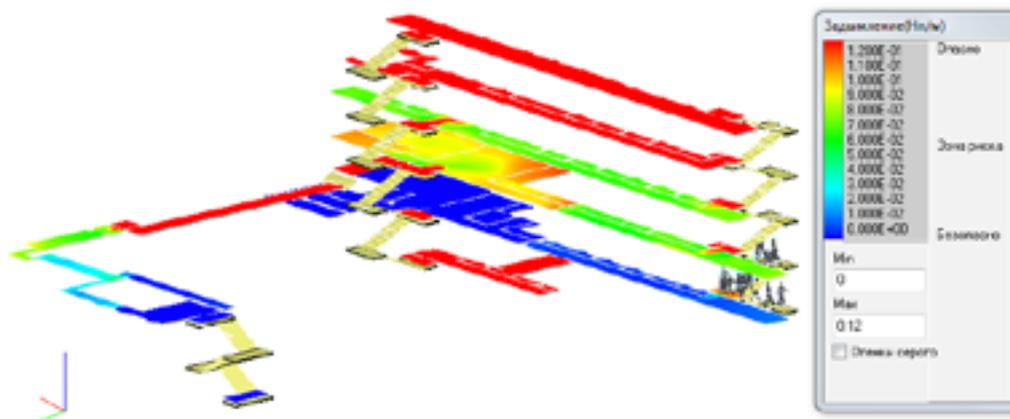


Рис. 6. Поле оптической плотности на 580 сек., Hn/m , окончание эвакуации

секундам соответственно. Дольше всего происходит эвакуации со второго этажа – заканчивается на 480 секунде, что связано с большим количеством людей на этаже и их выходом на заполненную людьми с верхних этажей лестничную клетку.

Распространение ОФП, за исключением цокольного этажа, быстрее происходит на верхних этажах

основного здания, что связано с формированием устойчивой конвективной колонки на неэвакуационной лестничной клетке («Лестница 2» + «Лестница из цоколя»). Горячие газы, поднимаясь вверх, вытесняют холодные газы вниз по «Лестнице 1», формируя, таким образом, в здании круговое течение.

В данном сценарии пожара блокирование путей

эвакуации происходит в основном по видимости. Области, где температура достигла критических значений, появляются немногим медленнее (рис. 5), но на некоторых участках верхних этажей здания блокирование по температуре происходит. (Замечание. Расчет выполнялся без учета теплопотерь на ограждающие конструкции.)

К моменту окончания эвакуации здание частично заблокировано по видимости (рис. 6): цокольный, 4-ый и 5-ый этажи основного здания и переход в пристройку.

Одним из важных этапов расчета является совместный пространственно-временной анализ, на основе которого рассчитывается вероятность эвакуации из здания. Автоматизированная процедура в этом случае является наилучшим решением, но требуется формализация некоторых правил. Так, анализ времени блокирования и времени эвакуации выполняется для каждого элемента здания (помещения, проема) на путях эвакуации (а не только для выходов в безопасную зону). Вероятность эвакуации определяется для каждого такого элемента, а наименьшая величина по всем элементам здания принимается как вероятность эвакуации из всего здания. Такой подход исключает возможность намеренного манипулирования и искажения результатов при анализе выполненных расчетов. Результаты анализа заносятся в таблицу, в которой содержится подробная поэтажная информация для элементов здания, лежащих на путях эвакуации людей в рассчитанном сценарии. Для каждого такого элемента здания приводится следующая информация:

- номер элемента здания (i);
- количество человек в начальный момент времени (если применимо);
- время начала эвакуации из i-го элемента здания ($t_{нз}^i$), сек (для помещений определяется как время начала движения первого человека, для проемов – время прохождения первого человека через этот проем);
- длительность эвакуации из i-го элемента здания ($t_{рэв}^i$), сек (расчетное время эвакуации из i-го элемента здания с момента ее начала, определяется по последнему человеку, покинувшему i-ый элемент);
- время окончания эвакуации из i-го элемента здания ($t_{рэв}^i + t_{нз}^i$), сек;
- время блокирования i-го элемента здания ($t_{бл}^i$), сек (случай 1 если i-ый элемент включен в расчетную зону распространения ОФП: для помещения $t_{бл}^i$ определяется как максимальное время достижения любым из ОФП предельно допу-

стимого значения на высоте 1,7 м от пола в дверных проемах этого помещения, через которые выходили люди; для проемов – при достижении ОФП предельно допустимых значений на высоте 1,7 м от пола; случай 2 – если i-ый элемент НЕ включен в расчетную зону распространения ОФП: для помещения, в котором в начальный момент находились люди, и проемов, через которые они проходили, $t_{бл}^i = \max$ времени расчета распространения ОФП);

- блокирующий ОФП (блокировка по потере видимости для случая, когда оба горизонтальных линейных размера помещения меньше 20 м, предельно допустимое расстояние по потере видимости принимается равным наибольшему горизонтальному линейному размеру);
- время скопления для i-го элемента здания, $t_{ск}^i$, сек (длительность скопления людей на i-м элементе с плотностью более 0.5 м²/м²);
- вероятность эвакуации из i-го элемента здания (P^i), которая рассчитывается исходя из выполнения одного из условий:

Условие 1: если для i-го элемента здания выполняется условие $t_{рэв}^i \geq 0.8 \cdot t_{бл}^i$, тогда $P^i = 0$;

Условие 2: если для i-го элемента здания выполняются условия $t_{рэв}^i + t_{нз}^i \geq 0.8 \cdot t_{бл}^i \geq t_{рэв}^i$ и $t_{ск}^i < 360$, тогда $P^i = 0,999 \cdot (0,8 \cdot t_{бл}^i - t_{рэв}^i) / t_{нз}^i$, если $t_{рэв}^i + t_{нз}^i \geq 0,8 \cdot t_{бл}^i \geq t_{рэв}^i$ и $t_{ск}^i \geq 360$, тогда $P^i = 0$;

Условие 3: если для i-го элемента здания выполняются условия $t_{рэв}^i + t_{нз}^i \leq 0.8 \cdot t_{бл}^i$ и $t_{ск}^i < 360$, тогда $P^i = 0,999$; если $t_{рэв}^i + t_{нз}^i \leq 0.8 \cdot t_{бл}^i$ и $t_{ск}^i \geq 360$, тогда $P^i = 0$.

В зависимости от того какое из условий выполняется, величина вероятности эвакуации из i-го элемента здания записывается в соответствующий столбец таблицы, в которой приводятся данные;

- вероятность эвакуации из здания (P_{Σ}), $P_{\Sigma} = \min \{ P^1, \dots, P^L \}$, L – количество элементов здания.

На рис.7 представлена часть таблицы с результатами анализа элементов путей эвакуации, сохраняемой в отдельный файл.

Получение такого подробного отчёта в том числе возможно благодаря структурированному представлению пространства здания, когда есть деление здания на лестницы и этажи, этажей на помещения, которые связаны проемами между собой. И таким образом все пространство здания представляет систему связанных и структурированных элементов.

Анализ результатов расчетов распространения ОФП и эвакуации для рассматриваемого офисного здания показывает, что итоговая вероятность эва-

Отчет о результатах расчета

Номер элемента здания	Имя элемента здания	Количество человек в начальный момент времени	Время начала эвакуации ($t_{инэ}$), сек	Длительность эвакуации ($t_{прэв}$), сек	Время окончания эвакуации ($t_{прэв} + t_{инэ}$), сек	Время блокирования ($t_{бл}$), сек	Блокирующий ОФП	Время скопления, tick., сек	$P_{из}$, если $t_{прэв} \geq 0.8 \cdot t_{бл}$	$P_{из}$, если $t_{прэв} + t_{инэ} \geq 0.8 \cdot t_{бл}$	$P_{из}$, если $t_{прэв} + t_{инэ} \geq 0.8 \cdot t_{бл}$
Этаж 5											
564	Помещение	3	360.25	2.75	363	760					0.999
292	Проем		362	3	365	360	Задымление(Нп/м)			0.787	
722	Проем		363.5		363.5	350	Задымление(Нп/м)			0.77	
Вероятность эвакуации из здания $P_{э}$			0.452								

Рис. 7. Отчёт по определению вероятности эвакуации из здания

куации из здания равна 0,452. Отсутствие СОУЭ и низкое значение вероятности эвакуации приводит к превышению расчетной величиной пожарного риска для данного сценария допустимого значения, и следовательно здание не отвечает требованиям пожарной безопасности. Таким образом, наличие лишь одной эвакуационной лестницы из основного здания, отсутствие доводчиков на дверях лестничных клеток, системы дымоудаления и СОУЭ приводят к высокой вероятности гибели людей при возникновении пожара.

Заключение. Настоящий момент можно считать благоприятным для начала массового внедрения рискоориентированного подхода к решению задач пожарной безопасности. Имеются развитые удобные инструменты компьютерного моделирования развития пожара и эвакуации. Интегрирование расчетных программ с BIM-программами проектирования существенно ускоряет этап создания расчетной области в расчетной программе, и на этапе проектирования можно самым оптимальным образом использовать выгоды рискоориентированного подхода, проверяя соответствие разрабатываемого решения требованиям пожарной безопасности расчетом.

Литература

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: утв. приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382: зарегистрировано в Минюсте России 6 авг. 2009 г. № 14486 (в ред. приказа МЧС России от 12.12.2011 № 749, в ред. приказа МЧС России от 02.12.2015 № 632). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2010613073. Литвинцев К.Ю., Амелчугов С.П., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Негин В.А., Харламов Е.Б. «Программный комплекс для численного моделирования динамики пожаров (σFire)», регистр. 11 мая 2010 г.
3. Рыжов А.П., Хасанов И.Р., Дектерев А.А. и др. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Методические рекомендации; ВНИИПО. – М., 2003. – 35 с.
4. Литвинцев К.Ю., Дектерев А. А., Необъявляющий П. А Моделирование развития пожаров в зданиях // Тепловые процессы в технике. – 2011. том 2, №1, стр. 9-11.
5. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2013610824. Кирик Е.С., Малышев А.В. «Программа по расчету времени эвакуации из многоэтажных зданий и сооружений моделью индивидуально поточного типа (SigmaEva)», 9 января 2013 г.
6. Кирик Е.С., Малышев А.В. Тестирование компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // Пожарная безопасность, N.1, 2014. С. 78-85.