

О ПРИМЕНЕНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СИГМА ПБ» ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ЭВАКУАЦИИ ИЗ ЗДАНИЯ

Е.С. Кирик, кандидат физико-математических наук.

**Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения
Российской академии наук.**

К.Ю. Литвинцев, кандидат физико-математических наук;

Е.Б. Харламов, кандидат физико-математических наук.

Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Рассмотрены вопросы применения моделирования эвакуации и развития пожара в задаче определения вероятности эвакуации из здания. Приводится пример решения этой задачи с использованием отечественного программного комплекса «Сигма ПБ».

Ключевые слова: опасные факторы пожара, программный комплекс «Сигма ПБ», расчет вероятности эвакуации

ON USING COMPUTER SIMULATION TOOL «SIGMA FS» TO DETERMINE A PROBABILITY OF AN EVACUATION FROM A BUILDING

E.S. Kirik. Institute of computational modeling of Siberian branch of the Russian academy of sciences.

K.Yu. Litvintsev; E.B. Kharlamov. Institute of thermophysics of Siberian branch of the Russian academy of sciences

The paper deals with using an evacuation and fire spread Russian simulation tool «Sigma FS» to solve an evacuation probability task.

Keywords: dangerous factors of fire, simulation tool «Sigma FS», calculation of the probability of evacuation

С 2009 г. в результате принятия Технического регламента (Техрегламента) о требованиях пожарной безопасности (Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ) в России начал формироваться институт независимой оценки пожарного риска. Для реализации Техрегламента были изданы подзаконные акты. Постановление Правительства Российской Федерации 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 Правительства Российской Федерации от 7 апреля 2009 г. № 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 Постановлений № 272 и № 304 была разработана и утверждена Приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (Методика) [1].

Основные расчетные действия, предписанные Методикой, это определение времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара (ОФП) (достигается за счет моделирования развития пожара) и определение времени эвакуации людей из отдельных частей здания и здания в целом (достигается путем моделирования эвакуации). На основе этих расчетов определяется вероятность эвакуации из здания. Специфика моделей и сложность решаемых задач таковы, что применение моделирования для определения времени 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 то же время численная реализация любой из моделей не тривиальная задача и является предметом специализированного профессионального труда.

Компьютерный программный комплекс «Сигма ПБ»

В статье представлена уникальная отечественная разработка - специализированный компьютерный программный комплекс «Сигма ПБ», предназначенный для расчета вероятности эвакуации из здания в соответствии с Методикой [1]. В нем объединены многолетние наработки в вычислительной гидродинамике, моделировании движения людей, численных методах, высокопроизводительных технологиях и инженерной графике.

Программный комплекс «Сигма ПБ» предназначен для выполнения расчетов распространения опасных факторов пожара и эвакуации, расчета вероятности эвакуации из многоэтажных зданий, сооружений и строений различных классов функциональной пожарной опасности.

Программный комплекс имеет компоненты:

- построитель трехмерной модели здания;
- 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.

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

Программа «СИГМА ПБ» имеет следующие преимущества перед российскими и зарубежными аналогами:

- единая программная среда с единым полем информационных ресурсов и форматом данных для решения задач расчета эвакуации и распространения ОФП;
- собственный построитель объектов, включая функцию «подложки», а также интеграция с BIM-ориентированной системой проектирования AutoDesk Revit;
- собственные расчетные модули;
- 3D-визуализация эвакуации и распространения ОФП в трехмерной виртуальной среде объекта;
- автоматизированное формирование отчетов о входных данных и результатах расчетов, схемы эвакуации, автоматизированное определение вероятности эвакуации.

Пример применения. Приведем пример расчета вероятности эвакуации на основе офисного здания, на котором в 2013 г. проводилась апробация программного комплекса «Сигма ПБ» совместно с Главным управлением МЧС России по Красноярскому краю.

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). 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 систем обнаружения возгорания, оповещения и дымоудаления; имеется единственная задымляемая эвакуационная лестница (Лестница 1 (восточная)).

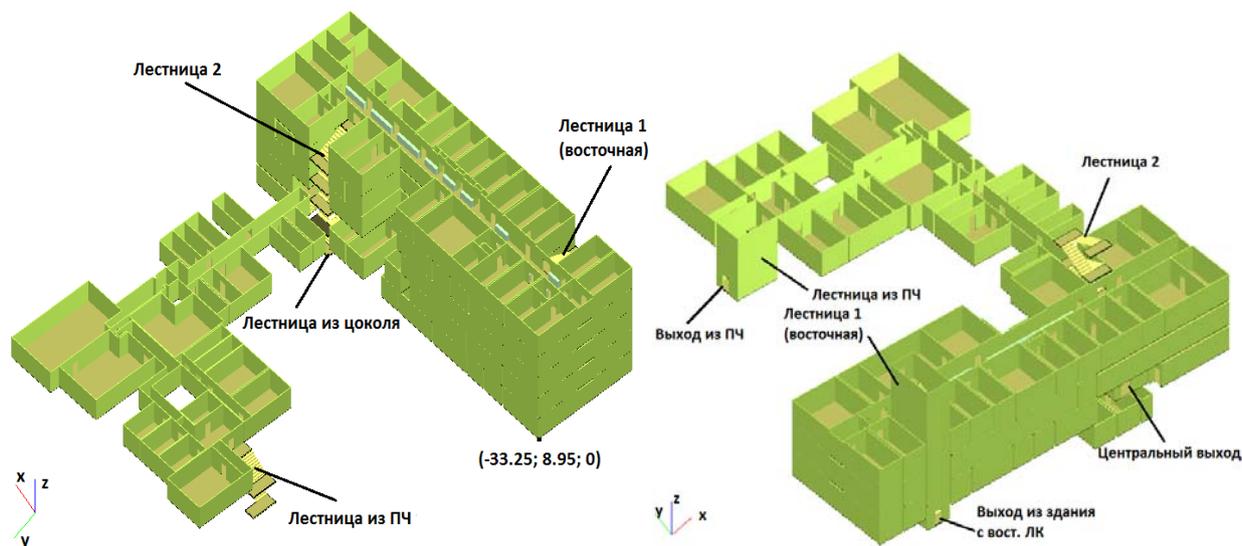


Рис. 1. 3D-модель здания. Вид 1 (слева), вид 2 (справа)

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

Рассматривался сценарий развития пожара (рис. 2) на цокольном этаже в складском помещении. Выбор обусловлен нахождением большого количества пожарной нагрузки, 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.

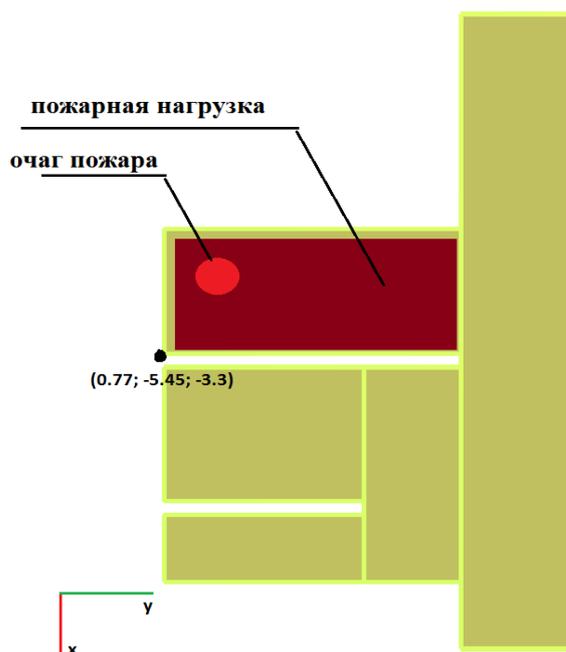


Рис. 2. Схема расположения пожарной нагрузки и очага пожара (цокольный этаж)

Для создания более худших условий в расчетную область включено помещение, где располагается очаг пожара, коридоры на всех этажах, включая пристойку, вестибюль первого этажа, лестничные клетки (другие помещения здания при расчете развития пожара не учитываются) (рис. 3). При расчете развития пожара принимались открытыми двери: «Центральный выход», «Выход из здания с восточной ЛК», «Выход из ПЧ».

В программе предусмотрена возможность сохранения в отдельный файл следующих начальных данных о сценарии пожара:

– пожарная нагрузка (номер помещения, в котором находится очаг пожара; координаты центра очага пожара; площадь пожарной нагрузки (ПН); площадь помещения; площадная плотность; характеристики ПН);

– системы вынужденного притока воздуха и дымоудаления (для каждой единицы указываются номер помещения, координаты центра области, площадь области, \pm расход);

– открытые проемы из здания, включая системы естественного дымоудаления (для каждой единицы указываются номер помещения, координаты центра области, площадь области);

– температура воздуха внутри здания в начальный момент времени, температура окружающей среды.

Сценарий эвакуации: количество людей соответствует максимальной нагрузке здания (451 человек), расположение по зданию – в соответствии с распределением по рабочим местам, задержка начала эвакуации относительно начала пожара составляет 360 с 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.

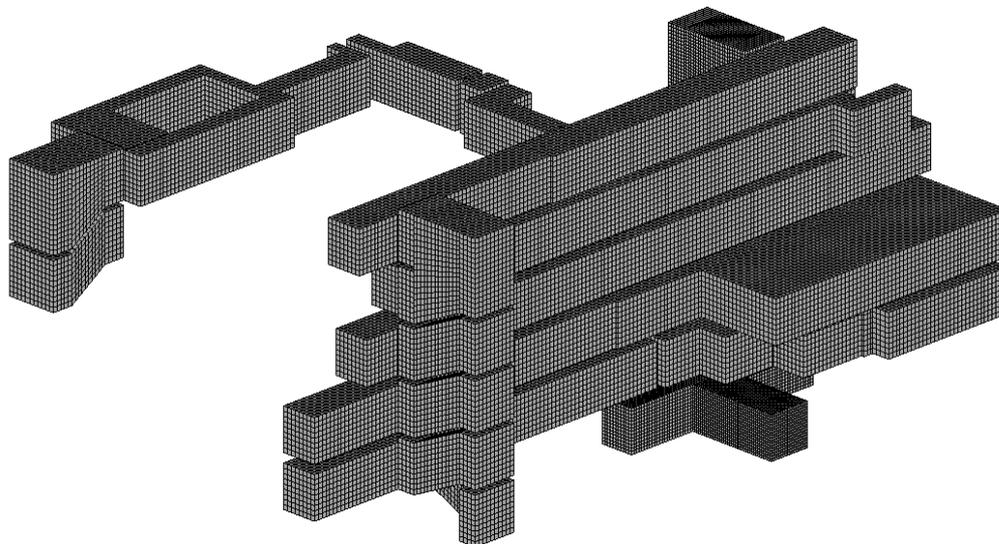


Рис. 3. Расчетная сетка для расчета распространения ОФП

В программе предусмотрена возможность сохранять в отдельные файлы следующую информацию:

– начальное расположение людей и поэтажные схемы путей эвакуации;

– данные по количеству людей в помещениях, времени начала эвакуации, проемах, связывающих помещение с соседними элементами здания;

– данные о геометрических характеристиках коридоров и списках проемов, связывающих помещения с каждым коридором;

– данные по геометрическим характеристикам проемов на путях движения людей, принятых в рассматриваемом сценарии;

– данные по геометрическим характеристикам лестниц, которые были включены в путь эвакуации людей в рассматриваемом сценарии.

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 пятый и четвертый этажи только к 403 с и 416 с соответственно. Дольше всего происходит эвакуация со второго этажа – заканчивается на 480 с, 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.

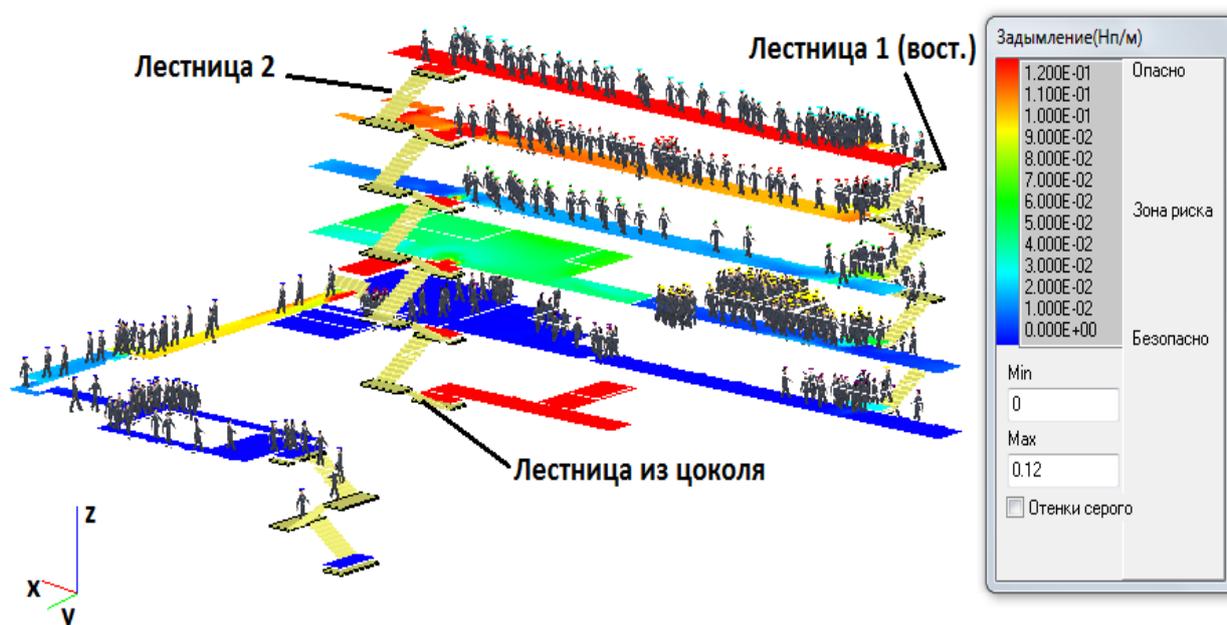


Рис. 4. Поле оптической плотности на 375 с, Нп/м, на всех этажах здания

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 (расчет выполнялся без учета теплопотерь на ограждающие конструкции).

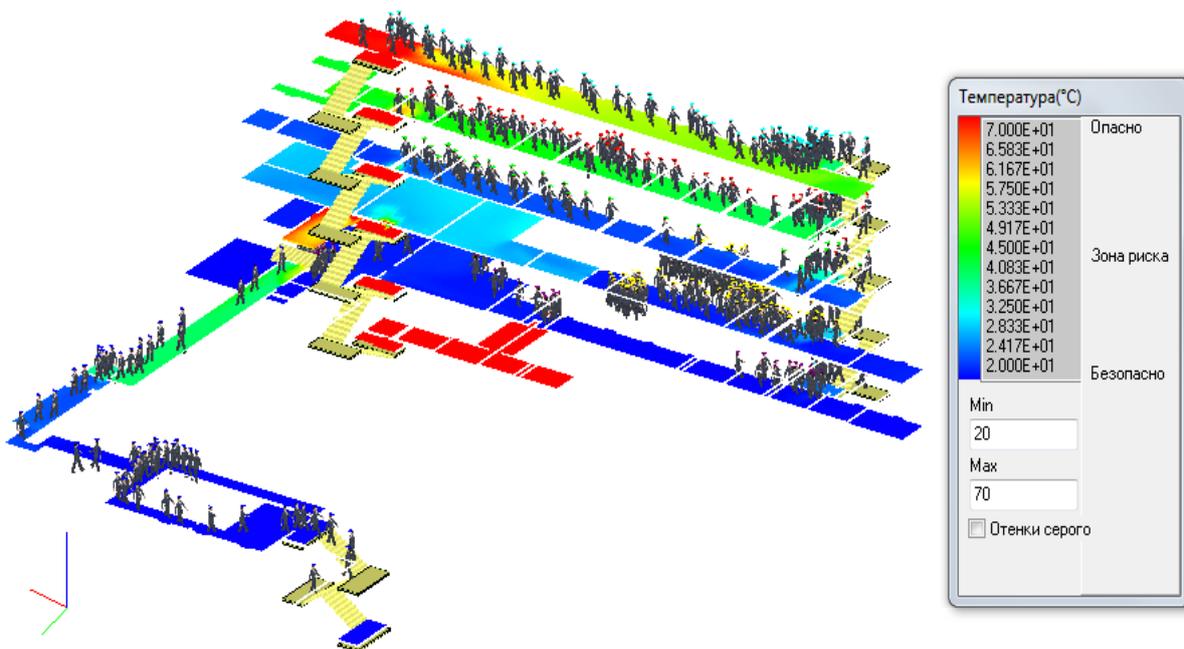


Рис. 5. Поле температуры на 375 с, градусы Цельсия

К моменту окончания эвакуации здание только частично заблокировано по видимости (рис. 6): цокольный, четвертый и пятый этажи основного здания и переход в пристройку.

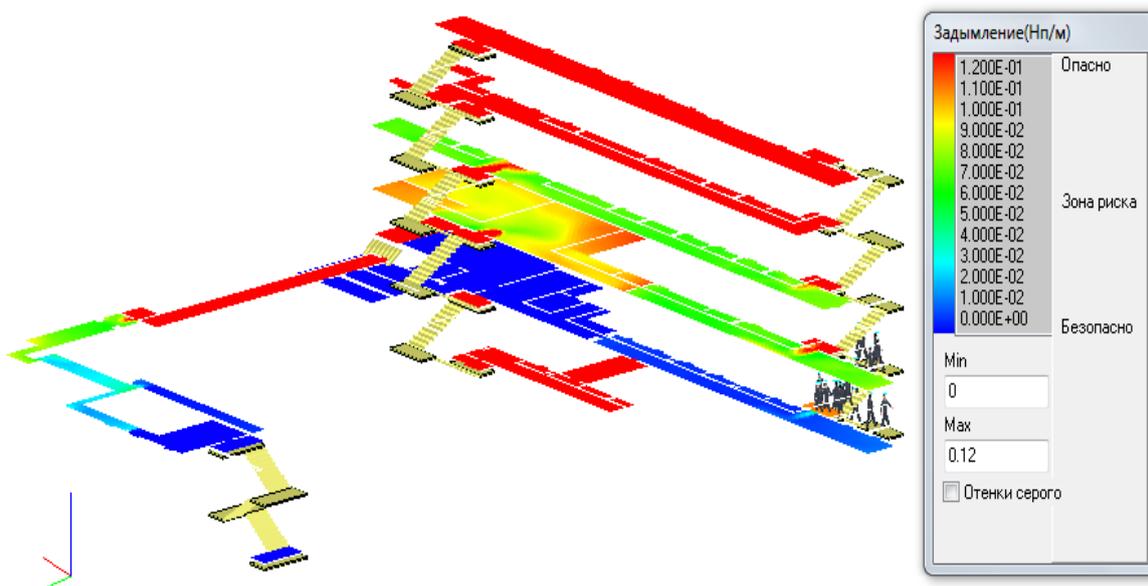


Рис. 6. Поле оптической плотности на 580 с, Нп/м, окончание эвакуации

В программе имеется модуль автоматизированного пространственно-временного анализа результатов расчета и определения вероятности эвакуации согласно Методике [1]. 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);
- имя элемента здания;
- количество человек в начальный момент времени (если применимо);

– время начала эвакуации из i -го элемента здания ($t_{нэ}^i$), с (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 ($t_{рэв}^i$), с (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 ($t_{рэв}^i + t_{нэ}^i$), с;

– время блокирования i -го элемента здания ($t_{бл}^i$), с (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 допустимого 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, $t_{ск}^i$, с (длительность скопления людей на i -м элементе с плотностью более $0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$);

– вероятность эвакуации из i -го элемента здания ($P_{э}^i$), которая рассчитывается, исходя из выполнения одного из условий:

Условие 1: если для i -го элемента здания выполняется условие $t_{рэв}^i \geq 0,8 * t_{бл}^i$, тогда $P_{э}^i = 0$;

Условие 2: если для i -го элемента здания выполняются условия $t_{рэв}^i + t_{нэ}^i \geq 0,8 * t_{бл}^i \geq t_{рэв}^i$

и $t_{ск}^i < 360$, тогда $P_{э}^i = 0,999 \frac{0,9 * t_{ск}^i - t_{нэ}^i}{t_{нэ}^i}$, если $t_{рэв}^i + t_{нэ}^i \geq 0,8 * t_{бл}^i \geq t_{рэв}^i$ и $t_{ск}^i \geq 360$, тогда $P_{э}^i = 0$;

Условие 3: если для i -го элемента здания выполняются условия $t_{рэв}^i + t_{нэ}^i \leq 0,8 * t_{бл}^i$ и $t_{ск}^i < 360$, тогда $P_{э}^i = 0,999$; если $t_{рэв}^i + t_{нэ}^i \leq 0,8 * t_{бл}^i$ и $t_{ск}^i \geq 360$, тогда $P_{э}^i = 0$.

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 ($P_{э}$):

$$P_{э} = \min \{ P_{э}^1, \dots, P_{э}^L \},$$

где L – количество элементов здания.

Отметим важный аспект при определении вероятности эвакуации из здания: происходит анализ времени блокирования и времени эвакуации 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 автоматизированный подход исключает возможность намеренного манипулирования и искажения результатов при анализе выполненных расчетов.

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

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 _{ірэв}), сек	Время окончания эвакуации (t _{ірэв} + t _{инэ}), сек	Время блокирования (t _{ібл}), сек	Блокирующий ОФП	Время скопления, tick., сек	P _{із} , если t _{ірэв} ≥ 0.8*t _{ібл}	P _{із} , если t _{ірэв} + t _{инэ} ≥ 0.8*t _{ібл} ≥ t _{ірэв}	P _{із} , если t _{ірэв} + t _{инэ} ≤ 0.8*t _{ібл}
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. Отчет по определению вероятности эвакуации из здания

Обработка результатов расчетов распространения ОФП и эвакуации для рассматриваемого офисного здания показывает, что итоговая вероятность эвакуации из здания равна 0,452. На практике это означает, что здание не отвечает требованиям пожарной безопасности. Таким образом, наличие лишь одной эвакуационной лестницы из основного здания, отсутствие доводчиков на дверях лестничных клеток и систем оповещения приводят к высокой вероятности гибели людей при возникновении пожара.

В ходе апробации программный комплекс «Сигма ПБ» получил высокую оценку специалистов Главного управления МЧС по Красноярскому краю как самодостаточный специализированный инструмент решения задачи определения вероятности эвакуации из многоэтажных зданий, сооружений и строений различных классов функциональной пожарной опасности в соответствии с Методикой [1]. Особое внимание получил модуль формирования отчетов по исходным данным автоматизированного анализа результатов расчетов и определения вероятности эвакуации.

Идеология, положенная в основу создания программного комплекса «Сигма ПБ», включает три принципа:

1. Минимизация усилий пользователя для проведения расчетов. Это достигается за счет единого информационного пространства для расчетов эвакуации и распространения ОФП, системы автоматического формирования отчетов, наглядности системы анализа.

2. Минимизация вмешательства пользователя в результаты расчетов. Это достигается минимизацией доступных пользователю параметров расчетных моделей, наличием системы автоматического формирования отчетов по исходным данным и результатов расчетов.

3. Открытость данных. При наличии выполненного и сохраненного проекта одним пользователем любой другой пользователь может проверить полученные результаты расчетов на предмет корректности исходных данных и соответствия представленных отчетов исследуемому объекту.

Литература

1. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382: зарег. в Минюсте России 6 авг. 2009 г. № 14486 (в ред. Приказа МЧС России от 12 дек. 2011 г. № 749). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. Программный комплекс для численного моделирования динамики пожаров (yFire): свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2010613073 (зарег. 11 мая 2010 г.) / К.Ю. Литвинцев: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 2010.

3. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: метод. реком. / А.П. Рыжов [и др.]. М., 2003. 35 с.

4. Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Необъявляющий П.А. Моделирование развития пожаров в зданиях // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 2. № 1. С. 9–11.

5. Кирик Е.С., Малышев А.В. Программа по расчету времени эвакуации из многоэтажных зданий и сооружений моделью индивидуально поточного типа (SigmaEva): свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2013610824 (зарег. 9 янв. 2013 г.).

6. Кирик Е.С., Малышев А.В. Тестирование компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // Пожарная безопасность. 2014. № 1. С. 78–85.