

## Лекция 2

В приложении к **приказу МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382** (с изменениями от 2 декабря 2015 г.) «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» закреплены правила определения расчетных величин пожарного риска. Он заключается в расчете индивидуального пожарного риска для людей, находящихся в здании.

Согласно этому приказу расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий определяется на основе моделирования движения людей до выхода наружу одним из следующих способов:

- по упрощенной аналитической модели движения людского потока (расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий устанавливается по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей);
- по математической модели индивидуально-поточного движения людей из здания (расчетное время эвакуации людей из здания устанавливается по времени выхода из него последнего человека. Перед началом моделирования процесса эвакуации задается схема эвакуационных путей в здании);
- по имитационно-стохастической модели движения людских потоков (множество людей, одновременно идущих в одном направлении по общим участкам пути, образуют людской поток).

Также, согласно данным натурных наблюдений установлено, что повороты пути не влияют на параметры движения людского потока.

В основном исследования ведутся на базе двух моделей: индивидуально-поточной и имитационно-стахостической. Первая активно развивается за рубежом, а вторая у нас.

Поводом к использованию имитационно-стахостической модели является то, что она базируется на экспериментальных данных и многократно показала свою состоятельность.

В индивидуально-поточной есть сложность с заданием параметров, т. к. они требуются для каждого участника движения. Но с другой стороны, такие модели позволяют моделировать сложные сценарии, когда отдельные агенты выполняют конкретные функции, например, по организации движения.

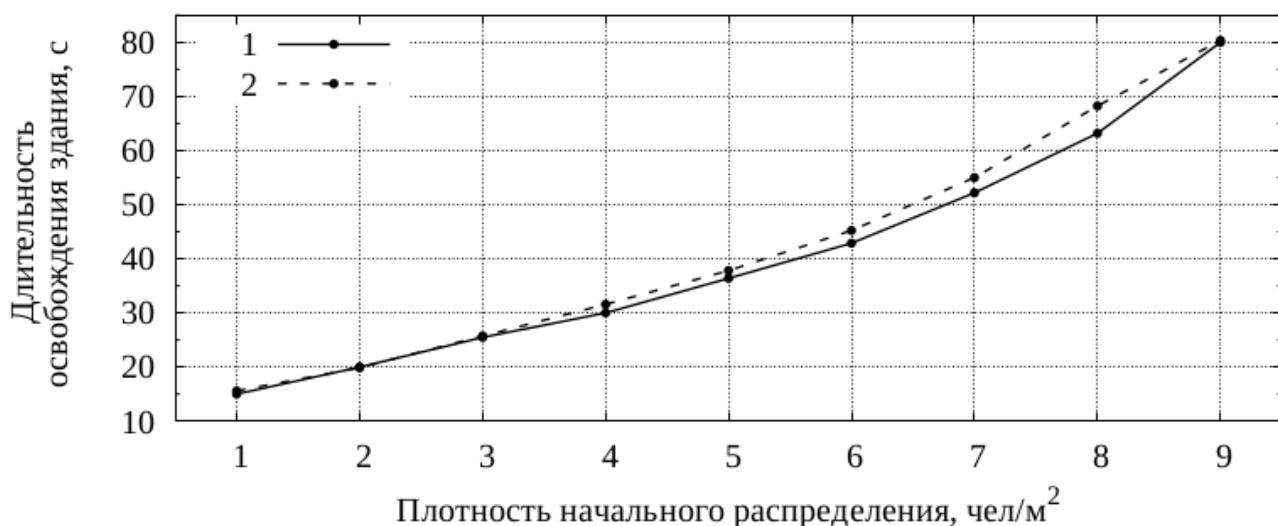
-----

Все модели из приказа МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382 реализованы в различных инструментах. Например:

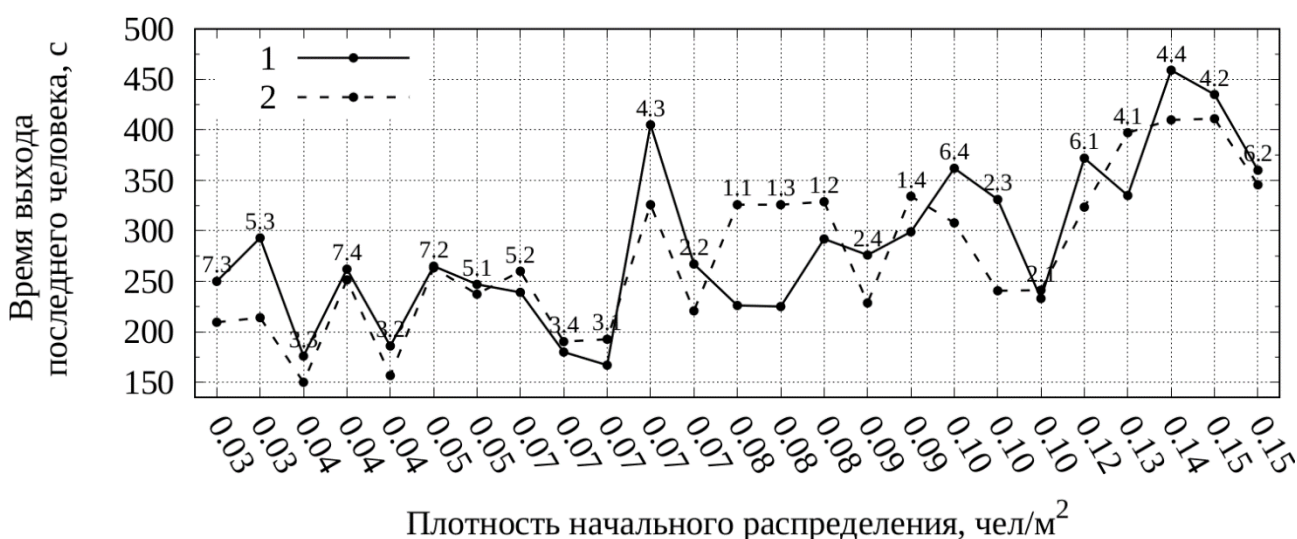
Fenix+ 3  
Сигма ПБ  
Urban  
Pathfinder

Мы используем свою реализацию имитационно-стахостической модели – сейчас EvacuationC (но были и другие, а сейчас снова хочется сделать другую реализацию) – <https://github.com/bvchirkov/EvacuationC>

-----  
Свою модель мы сверяли с тестовыми данными предоставленными Академией государственной противопожарной службой МЧС РФ [Холщевников В. В., Самошин Д. А., Истратов Р. Н., Шаранова М. М. Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара: учеб.-метод. пособие. Часть 1. М.: Академия ГПС МЧС России. 2019. 26 с.] и проверяли по реальным данным движения людей.



Результат сравнения с тестовыми расчетами: 1 – тестовые данные, 2 – данные компьютерного моделирования



Зависимость длительности времени выхода из здания последнего человека от начальной плотности людского потока  $D$ : 1 – экспериментальные данные, 2 – данные, полученные в результате имитационного моделирования

(По мотивам построение этой диаграммы в gnuplot родилась статья на хабр – <https://habr.com/ru/post/486628/>)

Мы считаем наиболее правильным способом валидации модели – сравнение с реальными данными для конкретного объекта.

При попытке валидации модели мы обнаружили, что необходим способ сравнения зданий между собой с точки зрения эвакуации, т. е. мы задались вопросом:

**почему из одних зданий люди выходят быстрее, а из других медленнее при прочих равных условиях, кроме разницы в объемно-планировочных решениях?**

И мы ввели новое понятие – **топологическая сложности здания** – количественная характеристика имманентных (неотъемлемых) свойств здания с позиций освобождения его людьми.

Впервые использовали этот термин в своей статье:

Колодкин В.М., Чирков Б.В. Валидация модели адаптивного управления движением людских потоков в динамической среде ограниченного пространства // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2020. Т. 30. Вып. 3. с. 480-496. DOI: 10.35634/vm200309

Топологическая сложность здания призвана характеризовать здание и с точки зрения связности его элементов, и с точки зрения временного интервала освобождения здания.

-----

Чтобы разобраться в особенностях понятия нужно познакомиться нашим определением модели ограниченного пространства (объемно-планировочные решения здания)

Для описания ограниченного пространства (например, здания) используется представление в виде двудольного графа  $G$ :

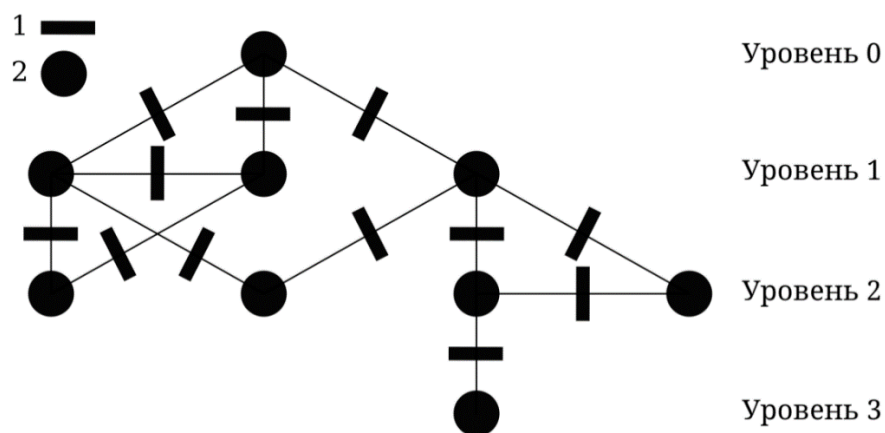
$$G = (W \cup B, \Gamma), W \cup B = U, W \cap B = \emptyset, \Gamma: U \rightarrow U,$$
$$\Gamma(x) = \begin{cases} \{w_1, w_2 \vee w_1, w_2 \in W\}, & \text{если } x \in B \\ \{b_1, b_2, \dots, b_n \vee b_n \in B\}, & \text{если } x \in W \end{cases}$$

где  $W$  – подмножество вершин, представляющих собой горизонтальные и наклонные участки, составляющих пути движения – помещения (комнаты, лестницы, коридоры);

$B$  – подмножество вершин, посредством которых вершины подмножества  $W$  соединены между собой – проемы;

$\Gamma(x)$  – правило, по которому любой вершине из подмножества  $W$  сопоставляются связанные с ней элементы из множества  $B$  и любому элементу из подмножества  $B$  сопоставляются связанные с ним участки из подмножества  $W$ ,  $\Gamma^2(x) = \Gamma[\Gamma(x)]$ .

Каждый узел, принадлежащий подмножеству проемов  $B$  соединяется двумя ребрами с узлами подмножества помещений  $W$  (помещение соединяется с другим помещением только через проем). Все элементы графа характеризуются своими параметрами. Например, основные характеристики вершин графа, относящихся к помещениям, – площадь, количество человек в помещении в данный момент времени, характерный размер помещения и т. д. Основные характеристики вершин графа, относящихся к проемам, – ширина и высота проема.



Фрагмент цифровой модели здания: 1 – узлы множества  $B$ ,  
2 – узлы множества  $W$

-----

Для оценки сложности здания модель здания можно характеризовать следующими базовыми показателями:

$N_w$  – количество вершин подмножества помещений  $W$  в модели здания (исключая вершину уровня 0);

$N_b$  – количество вершин подмножества проемов  $B$  в модели здания;

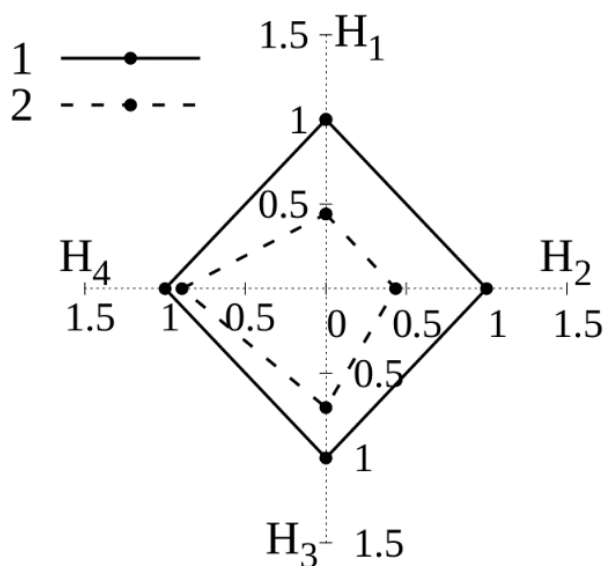
$M_w$  – максимальное количество вершин подмножества  $W$  одного уровня (максимальная ширина графа по подмножеству помещений);

$L_w$  – количество уровней в графе (минимальное количество вершин подмножества помещений  $W$  при обходе графа в глубину).

Каждый показатель связан с динамикой процесса движения людского потока и математической моделью поиска путей. Так количество вершин подмножества помещений  $W$  в цифровой модели ограниченного пространства  $N_w$  определяют количество мест возможного разветвления путей. Количество вершин подмножества проемов  $B$  в цифровой модели ограниченного пространства  $N_b$  могут влиять на динамику движения людского потока. В частности, увеличение количества проемов может привести к увеличению времени движения до безопасных зон (чем больше «узких мест» для потока людей, тем больше

оснований для его задержки). Ширина графа по подмножеству помещений  $M_w$  характеризует возможность изменения траекторий людских потоков и свидетельствует о существовании множества возможных путей. Количество уровней в графе  $L_w$  определяет минимальное количество помещений, которые нужно преодолеть по пути от дальнего помещения до безопасной зоны (уровень 0).

В качестве количественной характеристики топологической сложности для  $j$ -го здания принята величина, равная относительной площади фигуры, ограниченной точками  $H_{ij}$  на диаграмме пространства показателей  $H_{ij}$  при  $i=1,2,3,4$ . Если разместить точки на соответствующие оси координат, то каждая пара соседних точек вместе с точкой начала координат образует треугольник. Такое расположение точек позволяет вычислить площадь образовавшейся фигуры  $S_j$  для  $j$ -ой модели здания как сумму площадей треугольников.



Фигуры, ограниченные точками  $H_{ij}$  в пространстве показателей  $H_{ij}$  при  $i=1,2,3,4$ : 1 –  $S_0$  построенная при средних значениях  $\langle P_i \rangle$ , 2 – пример фигуры, построенной при  $P_{ij} \neq \langle P_i \rangle$

(Созданию этой диаграммы тоже посвящена статья на хабре – <https://habr.com/ru/post/492352>)

Для оценки топологической сложности  $j$ -го здания имеем:

$$\Omega_j = \frac{S_j}{S_0} = 0.5 \cdot S_j.$$

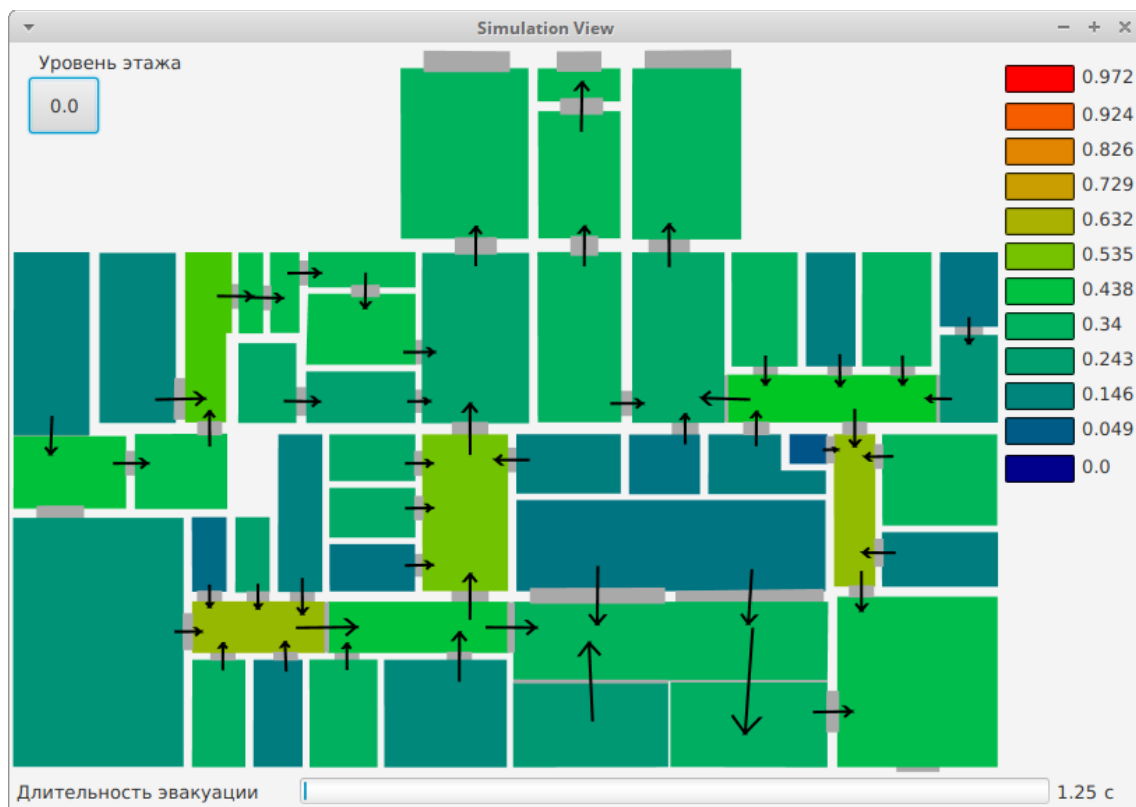
Результаты расчетов количественной характеристики топологической сложности зданий  $\Omega$  учебных корпусов ВУЗа представлены в таблице.

Таблица – Количественные характеристики топологической сложности зданий корпусов ВУЗа

№ корпуса	1	2	3	4	5	6	7
$\Omega$	1.36	0.84	0.32	1.85	0.95	1.21	0.82

-----

В нашей модели люди перемещаются в сторону безопасных зон начиная от этих безопасных зон. Перемещение происходит последовательно из всех помещений, которые связаны с безопасной зоной и т. д. по алгоритму обхода графа по алгоритму Дейкстры.



-----

Существует множество моделей, описывающих изменения состояния окружающей среды ограниченного пространства. Их можно разбить на три категории:

**Интегральные модели.** Представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара. Они следуют из фундаментальных законов физики – первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы и закона сохранения массы. Модели этого типа реализованы в таких продуктах как FIM, СИТИС: ВИМ и др.

**Зонные модели.** Основаны на фундаментальных законах физики – законах сохранения массы, импульса и энергии. Газовая среда помещений является открытой термодинамической системой, обменивающейся массой и энергией с окружающей средой через открытые проемы в ограждающих конструкциях помещения. Газовый объем помещения разбивается на характерные зоны, в которых для описания тепломассобмена используются соответствующие

уравнения законов сохранения. Размеры и количество зон выбирается таким образом, чтобы в пределах каждой из них неоднородность температурных полей и других параметров газовой среды были возможно минимальными, или из каких-то других предположений, определяемых задачами исследования и расположением горючего материала. К известным программным продуктам, реализующим зонные модели, относятся CFAST, BRANZFIRE, СИТИС: Блок.

**Полевые модели.** Основой для полевых моделей пожаров являются уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов в рассматриваемом малом контрольном объеме. Являются наиболее универсальными из существующих методов, поскольку основаны на решении уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчетной области. Реализация модели рассмотренного типа представлена в открытом программном продукте FDS.

Отличие приведенных моделей в детализации представления параметров помещения. Основной недостаток интегральных математических моделей пожара заключается в описании изменения среднеобъемных параметров всего объекта в целом. В зонной модели помещение разбивается на зону конвективной колонки, верхнюю, нижнюю зоны и создается интегральная модель по каждой зоне. В полевой модели используется разбиение пространства на значительно большее число областей, что позволяет задать горючую нагрузку именно в том виде, в котором она находится в помещении (реальную), а не распределенную по площади, имеющую усредненные показатели.