

На правах рукописи



Кочнов Олег Владимирович

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РЕЧЕВЫХ СИСТЕМ ОПОВЕЩЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ**

2.10.1. Пожарная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Научный руководитель

доктор технических наук, старший научный сотрудник Никифоров Александр Леонидович

Официальные оппоненты

Федоров Андрей Владимирович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной автоматике Академии Государственной противопожарной службы МЧС России

Елифанов Евгений Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений Воронежского государственного лесотехнического университета

Ведущая организация

Уральский институт ГПС МЧС России

Защита диссертации состоится 26 сентября 2024 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по адресу: 153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33, ауд. 1101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России: <https://www.edufire37.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 04.2.005.02,
кандидат технических наук, доцент

Колбашов Михаил Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основной задачей в вопросе обеспечения пожарной безопасности (ПБ) зданий и сооружений является безопасность людей, степень которой определяется численным значением индивидуального пожарного риска (ИПР). Согласно официальным статистическим данным ВНИИПО количество пострадавших и погибших при пожарах людей остается на очень высоком уровне. Одной из причин повышенной опасности является недостаточная эффективность систем противопожарной защиты (СПЗ), систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ). Требования нормативной документации (НД) по ПБ указывают на необходимость обеспечения работоспособности и эффективности СОУЭ, передачи достоверной и разборчивой информации, обоснования применяемых алгоритмов функционирования. Однако методических рекомендаций для оценки указанных параметров нет. Поэтому разработка таких документов является актуальной научной задачей.

В результате проведенного исследования установлено, что коэффициент соответствия СОУЭ требованиям НД, используемый в нормативной методике расчёта ИПР, не вполне корректен. Исходя из полученных расчётных данных и практического опыта, он принимает значения как выше, так и ниже значения 80 %. Предложенные методики расчёта достоверности передаваемой информации, времени задержки начала эвакуации, коэффициента технической эффективности, способа учёта надёжности СОУЭ и структурного построения СПЗ позволят, как будет показано ниже, сократить общее время эвакуации людей при пожаре, повысить точность расчёта величины ИПР.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области электроакустики занимались: Фурдуев В.В., Беляев С.В., Сапожков М.А., Никонов А.В., Шоров В.И., Макриненко Л.И., Давыдов В.В., Ефимов А.П., Вахитов Ш.Я., Ковалгин А.А., Фадеев Ю.А., Щевьев Ю.П., Продеус А.Н. Вопросами обеспечения беспрепятственной эвакуации людей при пожаре занимались: Милинский А.И., Предтеченский В.М., Тарасова Т.А., Калинин В.А., Вольф-Троп Л.И., Ройтбур С.М., Холщевников В.В. Вопросы исследования работоспособности СОУЭ в научной литературе напрямую не затрагивались, но могут быть раскрыты в рамках исследований надёжности и работоспособности систем противопожарной автоматики в трудах таких ученых, как Дружинин Г.В., Бубырь Н.Ф., Бабуров В.П., Фомин В.И., Бабурин В.В., Смирнов В.И., Шаровар Ф.И., в рамках исследований эффективности систем связи данный вопрос изучали Агеев Д.В., Васильев Н.В., Walker W.F., Окунев Ю.Б., Плотников В.Г., в рамках общесистемных исследований – Канторович Л.В., Bartalanfy L., Авдудевский В.С., Торбин В.У.

Целью диссертационного исследования является разработка научно-методических подходов к оценке основных функциональных параметров СОУЭ и степени их влияния на эффективность управления эвакуацией людей при пожаре. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

проанализировать основные функциональные параметры, определяющие работоспособность СОУЭ; разработать методику оценки достоверности передаваемой речевой информации, методику оценки технической эффективности СОУЭ, обобщающую основные параметры системы на всех этапах жизненного цикла; исследовать основные подходы к возможности разработки и обоснования алгоритма работы СОУЭ; исследовать влияние надёжности и эффективности речевых СОУЭ на оценку величины ИПР.

Научная новизна работы. Впервые получены, обоснованы и доказаны:

- экспериментальные данные, включающие основные параметры речевых оповещателей (РО), применяемых в СОУЭ;
- методика расчёта коэффициента обобщенной топологической эффективности РО, учитывающая количество людей в защищаемых помещениях, позволяющая оценить качество озвучивания этих помещений;
- методологические подходы, необходимые для разработки и обоснования алгоритмов работы СОУЭ, обеспечивающих сокращение времени эвакуации;
- методика оценки технической эффективности СОУЭ, опирающаяся на общесистемный подход, учитывающая надёжность и качество функционирования системы на каждом этапе жизненного цикла;

Теоретическая значимость работы заключается:

- в получении математической зависимости качества озвучивания помещений от численности и состава защищаемого контингента для широкого спектра РО;
- в разработке математической модели расчёта параметров поэтапной эвакуации, обосновании алгоритма работы СОУЭ;
- в построении математической модели для определения технической эффективности, обобщающей надёжность технических средств СОУЭ и показателей, оказывающих влияние на снижение качества функционирования системы, позволяющая более точно оценить работоспособность системы на всех этапах жизненного цикла.

Практическая значимость работы заключается в предоставлении инженерам-проектировщикам, расчётчикам ИПР, проектно-монтажным организациям методик расчёта основных функциональных параметров речевых СОУЭ, позволяющих:

- оценить качество озвучивания защищаемых помещений с целью снижения времени реакции людей на речевое сообщение о пожаре и необходимости эвакуироваться;
- разработать и обосновать применяемый алгоритм функционирования СОУЭ с целью минимизации скопления людей при эвакуации;
- рассчитать надёжность и техническую эффективность СОУЭ для более точной оценки величины ИПР. Предложенные модели и методики содержат практически подтверждённые формулы для вычисления функциональных параметров СОУЭ и могут быть использованы при оценке величины ИПР, в научных и учебных целях.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с пп. 14, 16 в части, касающейся разработки СПЗ, а также в части п. 17 паспорта специальности 2.10.1. «Пожарная безопасность» (технические науки).

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований; проведение лабораторных измерений параметров РО; акустические измерения на исследуемом объекте защиты. Методики электроакустических расчётов (ЭАР) построены на основе геометрически-лучевой теории и методов архитектурной акустики. Методика расчёта разборчивости построена с использованием статистической теории акустики и формантного метода. Для обоснования работоспособности СОУЭ предложено использовать теорию алгоритмов и теорию графов. Для расчёта надёжности СОУЭ применена теория марковских процессов. Построение коэффициента технической эффективности выполнено с использованием общесистемного, функционального подхода и принципа модульной декомпозиции. Для определения общей структурной надёжности СПЗ использован логико-вероятностный подход. Адекватность полученных результатов подтверждена методом ранговой корреляции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчёта коэффициента эффективности топологии речевых оповещателей, позволяющая повысить достоверность оповещения и снизить задержки эвакуации людей при пожаре.
2. Методические подходы к построению и обоснованию алгоритма работы речевой СОУЭ, позволяющие минимизировать скопления и сократить время эвакуации людей при пожаре.
3. Методика оценки технической эффективности СОУЭ, обобщающая основные надёжностные и функциональные параметры с целью повышения точности расчёта и прогнозирования величины индивидуального пожарного риска в общественных зданиях и сооружениях.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена комплексом теоретических расчетов и эмпирических исследований: акустическими измерениями в безэховой камере; электроакустическими измерениями на исследуемом объекте защиты; статистическими испытаниями для оценки надёжности технических средств СОУЭ; измерениями времени эвакуации людей при несанкционированном оповещении о пожаре; практическим участием в проверке работоспособности речевой СОУЭ на исследуемом объекте защиты. Степень достоверности полученных результатов и выводов подтверждена расчётами. Погрешность расчёта топологической эффективности не превышает 1,5 %. Точность теоретической оценки поэлементной надёжности блоков управления оповещением подтверждена эксплуатационными данными. Важность этапов жизненного цикла СОУЭ получена методом статистического опроса со степенью согласованности мнений специалистов по каждому этапу не ниже 91 %. Корректность оценки технической эффективности подтверждается официальными статистическими данными ВНИИПО.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования представлялись и обсуждались на XIII, XVIII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019 г., 2023 г.); III, VI Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019 г., 2023 г.); XVIII, XIX Международной научно-практической конференции «Гражданская оборона и природно-технические системы» (Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2022 г., 2023 г.); XI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023 г.). По теме диссертации написано три учебных пособия, получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2002612097, № 2024611103, № 2024612813.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 35 статьях по теме научно-квалификационной работы (диссертации), среди которых 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, одной монографии.

Структура и объём работы. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста и включает введение, пять глав, выводы и 12 приложений. Работа содержит 57 рисунков и 32 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 150 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён аналитический обзор статистики пожарной безопасности, основных нормативных требований и специфики применения систем оповещения как в отечественной, так и зарубежной практике, проанализированы статистические данные ВНИИПО, согласно которым число пострадавших в городах, в том числе в общественных зданиях, превышает нормативное значение. Сделан вывод, что одной из причин превышения ИПР является низкая эффективность СПЗ, частью которой является СОУЭ. Основными способами повышения эффективности речевых СОУЭ в зданиях с массовым пребыванием людей являются обеспечение их надёжности, устойчивости и достоверности передаваемой информации, а также работоспособности, обеспечиваемой учётом всех этапов жизненного цикла системы.

Во второй главе исследованы характеристики РО, предложены методы учета неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), характеристик направленности, частотных коррекций, позволяющих выполнить

ЭАР, расчет коэффициента топологической эффективности РО, разборчивости передаваемой информации с целью снижения задержки начала эвакуации. **Основные результаты:** для определения уровня звукового давления в расчётной точке (РТ) предложено воспользоваться следующей формулой (1):

$$L_{\text{дБА5}} = 10 \lg \sum_{i=1}^5 10^{0.1(P_{\theta i}(\theta) + 10 \lg(\frac{P_{\text{ВТ}} + 4}{r^2} - \Delta P_{\text{ЧХi}} - \Delta P_{\text{Рi}} - \Delta P_{\text{Ai}})}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ВТ}}$ – мощность РО, Вт;

r – расстояние от геометрического центра РО до РТ, выбранной на расчетной плоскости (РП), в наиболее удаленной части помещения или вблизи источника шума;

B – акустическая постоянная помещения;

$\Delta P_{\text{ЧХi}}$ – коэффициент, учитывающий коррекцию АЧХ, дБ;

$\Delta P_{\text{Рi}}$ – коэффициент, учитывающий частотную речевую коррекцию, дБ;

ΔP_{Ai} – коэффициент, учитывающий коррекцию по шкале «А», дБ.

Уровень звукового давления в РТ, лежащей вне направления рабочей оси РО, $P_{\theta i}(\theta)$, можно вычислить в предположении, что диаграмма направленности РО может быть аппроксимирована полуэллипсом (рисунок 1).

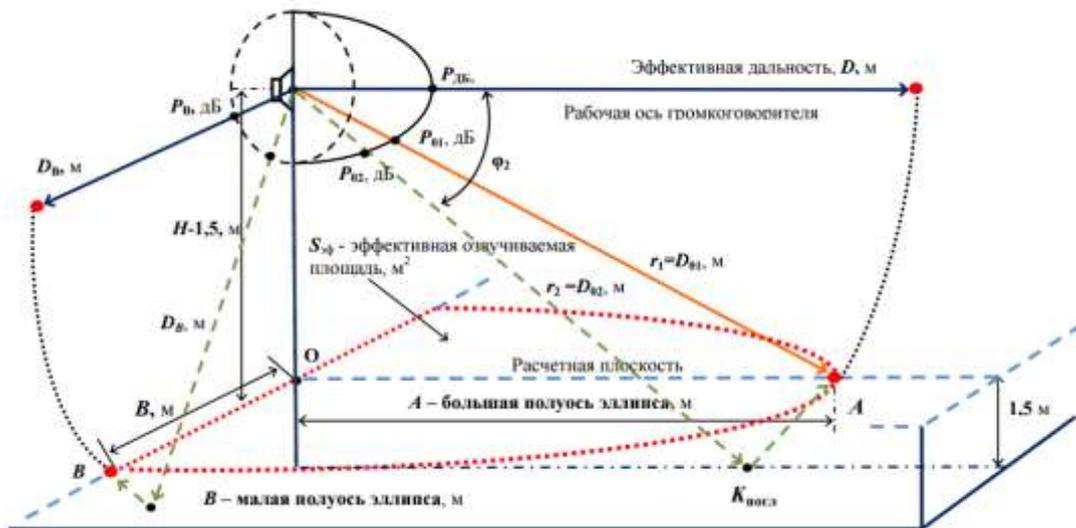


Рисунок 1 – Пояснение к расчету эффективной площади, озвучиваемой настенным РО, с учетом отражений от пола

Согласно геометрическому построению (рисунок 1) звуковое давление, развиваемое РО в направлении, лежащем вне рабочей оси:

$$P_{\theta i}(\theta) = P_0 / \sqrt{(\sin \theta \cdot \cos \alpha)^2 + \left(\frac{\sin \theta \cdot \sin \alpha}{k_{\Gamma}}\right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{k_{\text{В}}}\right)^2}, \quad (2)$$

где P_0 – чувствительность РО на рабочей оси, дБ;

$k_{\Gamma}/k_{\text{В}}$ – коэффициенты сжатия полуэллипса в горизонтальной (Γ) и вертикальной (В) плоскости.

Углы в декартовой системе координат (см. рисунок 2.2. диссертации):
 $\alpha = \tan^{-1} b/a$ -УП; $\beta = \tan^{-1} h/a$ -УН; $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha)} \right)$, где УП, УН - углы поворота и наклона РО (в радианах), h , - высота установки РО.

Данное геометрическое представление связывает основные функциональные параметры РО с шириной диаграммы направленности (ШДН) – углом раскрыва, при котором звуковое давление уменьшается на 6 дБ относительно рабочей оси, тогда коэффициенты сжатия полуэллипса в вертикальной и горизонтальной плоскости: $k_{Г/В} = \frac{P_{Г/В}}{P_0}$, где $P_{Г/В} =$

$\frac{P_0 \cdot (P_0 - 6) \cdot \sin \frac{\text{ШДН}_{Г/В}}{2}}{\sqrt{P_0^2 - ((P_0 - 6) \cdot \cos \frac{\text{ШДН}_{Г/В}}{2})^2}}$. При известных коэффициентах сжатия, можно получить ШДН (в градусах) в различных плоскостях по формуле (3):

$$\text{ШДН}_{Г/В} = 360 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{k_{Г/В}}{(P_0 - 6)} \cdot \sqrt{\frac{P_0^2 - (P_0 - 6)^2}{(1 - k_{Г/В}^2)}} \right) / \pi. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) позволяют определить уровень звукового давления в любом направлении, объединяют параметры установки РО: высоту установки РО, угол наклона РО при $УН < \beta$, угол поворота РО при $УП < \alpha$, позволяют переходить от коэффициентов сжатия, указываемых в полярных координатах, к ШДН и обратно. Результаты практических измерений полностью подтверждают возможность использования предложенной аппроксимации, расхождение которой с альтернативными способами расчета незначительно: среднеквадратическое отклонение (СКО) $P(\theta)$ от $D(\theta)$, $\sigma = 0,38\%$; СКО $P(\theta)$ от $R(\theta)$, $\sigma = 0,31\%$. Для определения качества озвучивания защищаемого помещения предложен коэффициент обобщенной топологической эффективности РО в виде суммы (топологических) коэффициентов $K_{ЭТ_Pi}$, весовое значение которых учитывается количеством n_i защищаемых людей по каждой зоне оповещения (4):

$$K_{ЭТ_РО} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M n_i \cdot K_{ЭТ_Pi}, \quad (4)$$

где M – количество зон оповещения, шт.;

N – общее количество людей в защищаемых зонах, чел.

Коэффициент эффективности топологии РО, устанавливаемого в i -ой зоне оповещения: $K_{ЭТ_Pi} = \frac{S_{ЭФi}}{1,25S_{30i}}$, где $S_{ЭФi}$ – эффективная озвучиваемая площадь для i -й зоны оповещения, m^2 ; S_{30i} – площадь i -й зоны оповещения, m^2 , с учетом коэффициента запаса обусловленного наличием так называемых «темных зон» – мест в помещении с неоднозначной идентификацией разборчивости речи. При $S_{ЭФi} > 1,25S_{30i}$, $K_{ЭТ_Pi} = 1$. Расчёт эффективной площади, озвучиваемой потолочным РО, тривиален, поэтому в работе не рассматривается. Методика расчета эффективной площади, озвучиваемой настенным РО, опирается на приведенный выше результат аппроксимаций и учитывает отражения от различных поверхностей. Эффективную площадь, озвучиваемую настенным РО,

можно определить в виде площади полуэллипса как проекции или пересечения полуэллипсоида с РП. Полуоси эллипса можно определить с учетом эффективной дальности D_φ и отражения от пола как аналога градиентной составляющей (5):

$$D_\varphi = 10^{0,05(P_0 + 10 \lg(P_{BT}) - L_{УШ} - 15)} + 10^{0,05(L_{РТ2} - L_{РТ})}, \quad (5)$$

где $L_{УШ} = 10 \lg(10^{0,1L_{ШП}} + 10^{0,1L_{ИП}})$ – уровень шума в защищаемом помещении;
 $L_{ШП}$ – уровень шума в помещении в отсутствие шумового источника, дБА;
 $L_{ИП}$ – уровень шума дополнительного шумового источника или помехи, дБА;
 $L_{РТ}$ – уровень звукового давления в РТ без учета отражений.

Уровень звукового давления в РТ с учетом звукопоглощения поверхностей (6):

$$L_{РТ2} = 10 \lg(10^{0,1(P_{\varphi_1} - 20 \log(r_1))} + 10^{0,1(P_{\varphi_2} + 10 \log(1 - k_{\text{погл}}) - 20 \log(r_2)}), \quad (6)$$

где P_{φ_1} – звуковое давление в направлении РТ;

P_{φ_2} – звуковое давление в направлении зеркально-отраженной (мнимой) РТ;

$k_{\text{погл}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности на 4 кГц; $r_1 = D$;

$$r_2 = \sqrt{A^2 + (H + 1,5)^2}, \text{ м}; \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \frac{(H - 1,5)}{A} - \text{УН}; \quad \varphi_2 = \tan^{-1} \frac{(H + 1,5)}{A} - \text{УН};$$

H – высота установки РО.

В качестве $k_{\text{погл}}$ предложено использовать эквивалентный коэффициент звукопоглощения: $\hat{a}_{\text{экви}} = \frac{1}{S}(\alpha_1 \cdot (S_{\text{ЭФ}} - 0,17N) + 0,17N\alpha_{2i})$, где α_{1i} – средний коэффициент звукопоглощения материалов отделки, мебели; α_{2i} – звукопоглощение одного человека для i -й частоты. Эквивалентный коэффициент звукопоглощения позволяет определить акустическую постоянную помещения B в формуле (1) и перейти к расчету речевой разборчивости, для определения которой предложено использовать формантный метод. Формантную разборчивость для русской речи можно определить как среднее от вкладов пяти октавных частот нормативного диапазона равновероятной разборчивости следующим образом (7):

$$K_R = 0,05(k_{\varphi_1} + 3k_{\varphi_2} + 4k_{\varphi_3} + 6k_{\varphi_4} + 6k_{\varphi_5}), \quad (7)$$

где $k_{\varphi_1} - k_{\varphi_5}$ – коэффициенты разборчивости пяти октавных частот;

$$k_{\varphi_i} = \frac{(E_{\varphi_i} + 6)}{30}, \text{ при } 0 < E_{\varphi_i} \leq 18 \text{ дБ};$$

$$E_{\varphi_i} = L_{\text{дБ}i} - L_{\text{УШ}}.$$

Формула (7) позволяет достаточно легко перейти к оценке словесной и слоговой разборчивости. Таким образом, предлагаемая методика, оперирующая минимальными (актуальными) входными данными, позволяет определить электроакустические параметры, необходимые для оценки качества озвучивания защищаемых помещений.

В третьей главе предложены основные подходы к разработке и обоснованию алгоритма работы СОУЭ, актуальность которого продиктована

требованиями НД, а также действующей методикой расчета величины ИПР для общественных зданий (нормативной методикой), в которой присутствует параметр – время задержки оповещения. Фактической необходимостью применения алгоритма работы или функционирования системы оповещения является сокращение времени эвакуации людей из зоны обнаружения пожара. На рисунке 2 приведен алгоритм, учитывающий различные факторы, необходимые для принятия решения о применении поэтапного оповещения.

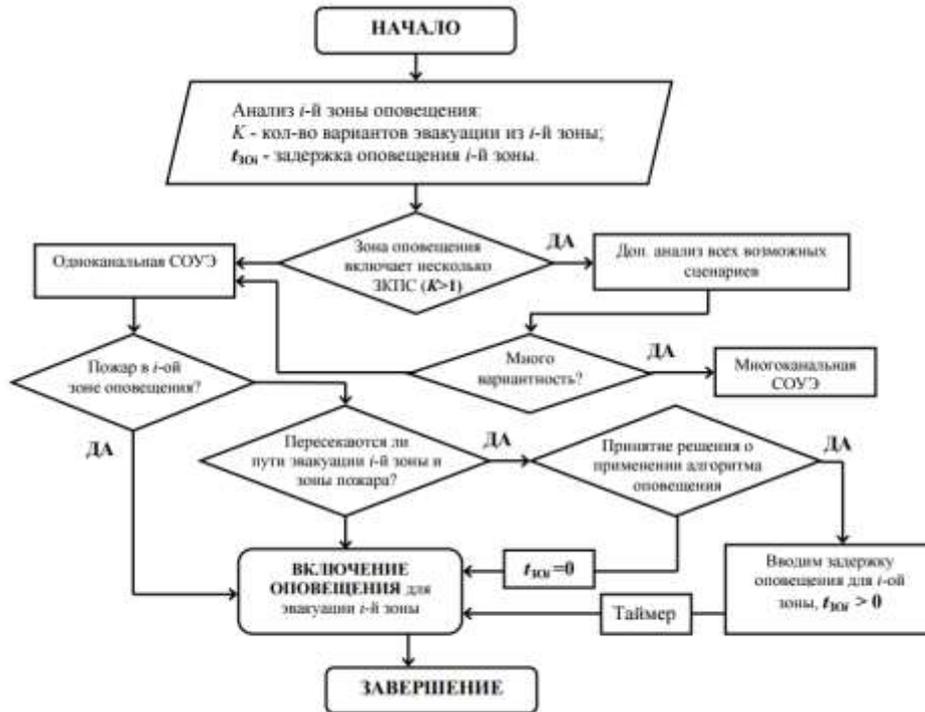


Рисунок 2 – Алгоритм принятия решения о необходимости введения задержки оповещения

Разработка того или иного алгоритма является трудоемкой и ответственной задачей, требующей индивидуального подхода. Приведем условие, определяющее необходимость введения задержек оповещения. Возможность слияния потоков верхних и нижних этажей можно записать в следующем виде: $Q_{Hi} > \sum_{k=j-1}^{k=j+1} q_{i,k}$, где $q_{i,k}$ – интенсивность людского потока на $j-1$, j , $j+1$ этажах; Q_{Hi} – максимально допустимое значение интенсивности движения людей

по i -му виду пути. Запишем условие неслияния эвакуирующегося потока с верхними этажами: тыльная часть эвакуирующегося потока должна подойти к месту слияния раньше, чем первый человек встречного потока (эвакуирующихся с верхнего этажа) достигнет данного места: $t_{Tij} \leq t_{Gij+1}$, где t_{Tij} – время достижения тыльной части эвакуирующихся с места обнаружения ОФП (j -го этажа) места слияния (i -го участка); t_{Gij+1} – время достижения головной части эвакуирующихся с верхнего ($j+1$ -го) этажа места слияния. Условие неслияния эвакуирующегося потока с нижними этажами: тыльная часть эвакуирующегося потока должна подойти к месту слияния (нижнему этажу) раньше, чем головная часть эвакуирующихся с нижнего этажа достигнет данного

места: $t_{Ti+1j} \leq t_{\Gamma i+1j-1}$, где $t_{\Gamma i+1j}$ – время достижения тыльной части эвакуирующихся с j -го этажа места следующего слияния ($i+1$ -го участка); $t_{\Gamma i+1j-1}$ – время достижения головной части эвакуирующихся с нижнего ($j-1$) этажа места слияния. Тогда время задержки верхних $t_{3НЭВj}$ и нижних $t_{3НЭНj-1}$ этажей можно определить: $t_{3НЭВj+1} = \sum_{i=1}^m t_{Tij}$; $t_{3НЭНj-1} = \sum_{i=1}^n t_{Tij}$, где m – количество участков от места обнаружения до места слияния основного эвакуирующегося потока с потоком верхних этажей; n – количество расчетных участков до места слияния основного потока с эвакуирующимися с нижних этажей, $n > m$. Для оптимизации (логистики) маршрутов эвакуации предложено использовать алгоритм Дейкстры (один из методов теории графов), согласно которому оптимальным является маршрут с наименьшим суммарным временем движения. Каждому ребру взвешенного графа – отрезку эвакуационного пути – можно назначить вес, определяемый заранее рассчитанной вероятностью эвакуации по этому пути: $W_{ij} = \frac{1}{P_{Эij}} \cdot \sum_{i=1}^m t_{ЭTij}$, где $\sum_{i=1}^m t_{ЭTij}$ – суммарное время движения по каждому (от 1 до m) участку пути, мин; $P_{Эij}$ – вероятность эвакуации по i -му виду пути j -го этажа. Очевидно, что оптимальным является маршрут с наименьшим весом $\min(W_{ij})$. Алгоритм работы СОУЭ может быть достаточно полно представлен в виде карты соответствий входных и выходных сигналов, номеров зон обнаружения и зон оповещения транслируемых сообщений. Табличное представление в виде соответствия входных параметров и выходных данных является удобным и эффективным инструментом, позволяющим интегрироваться в общую структуру ПБ здания, называемую «Пожарная Матрица», формируемую и используемую на всех этапах жизненного цикла СОУЭ.

В четвертой главе предложен метод расчета технической эффективности СОУЭ. Надежность технических средств СОУЭ в виде коэффициента соответствия требованиям НД присутствует в нормативной методике, однако данный (безусловный) коэффициент не вполне точно отражает фактическую работоспособность системы. В качестве показателя, характеризующего работоспособность СОУЭ, предлагается использовать коэффициент технической эффективности, определяемый ее надежностью и степенью снижения качества функционирования на каждом из этапов жизненного цикла, а в качестве метода для его построения – общесистемный подход. Известно, что надежность СОУЭ как обслуживаемой системы определяется коэффициентом оперативной готовности. В общем виде, без учета степени согласованности различных подсистем, техническую эффективность автоматической системы можно представить: $P_{ТЭ}(t) = k \cdot \int_0^T K_{ОГ}(t) \cdot \varphi(t) dt$, где k – коэффициент, характеризующий степень снижения качества функционирования системы; $K_{ОГ}(t)$ – коэффициент оперативной готовности системы; $\varphi(t)$ – функция плотности распределения времени наступления потребности в СОУЭ на всем периоде эксплуатации (T). Техническую эффективность СОУЭ в виде вероятности выполнения своей целевой задачи с учетом коэффициента согласованности элементов системы можно представить:

$P_{ТЭ}(t)=P_{ОБН}(t_{ОБН}) \cdot P_{ОГ}(t) \cdot R_{П} \cdot R_{М} \cdot R_{ЧО}$, где $P_{ОБН}(t_{ОБН})$ – вероятность обнаружения пожара системой пожарной сигнализации (СПС) за время работы, до момента обнаружения, $t_{ОБН}$ (далее примем, $P_{ОБН}(t_{ОБН})=1$); $R_{П}$ – надежность (качество) проектирования; $R_{М}$ – надежность (качество) монтажа; $R_{ЧО}$ – надежность (качество) управления (ЧО – человек-оператор). Качество проектирования можно интерпретировать в виде вероятности выполнения системой поставленной задачи, а для численной оценки использовать коэффициент, учитывающий снижение качества ее выполнения. Под качеством монтажа будем понимать степень согласованности отдельных элементов системы. Качество управления можно оценить вероятностью – относительным количеством ошибок оператора управления СОУЭ. Заменой $R_{ЧО}$ на параметр, оценивающий качество управления, $K_{У}$, введением параметра, учитывающего снижение качества функционирования на этапе эксплуатации. Коэффициент технической эффективности СОУЭ можно построить в виде обобщенного полинома (позинома) (8):

$$P_{ТЭ}=P_{ОГ}(t) \cdot (K_{П}^{\omega_{П}} \cdot K_{М}^{\omega_{М}} \cdot K_{Э}^{\omega_{Э}} \cdot K_{У}^{\omega_{У}})^w, \quad (8)$$

где $K_{П}$ – коэффициент, учитывающий качество проектирования;

$\omega_{П}$ – коэффициент значимости этапа проектирования;

$K_{М}$ – коэффициент, учитывающий качество монтажа;

$\omega_{М}$ – коэффициент значимости этапа монтажа;

$K_{Э}$ – коэффициент, учитывающий качество эксплуатации;

$\omega_{Э}$ – коэффициент значимости этапа эксплуатации;

$K_{У}$ – коэффициент, учитывающий качество управления;

$\omega_{У}$ – коэффициент значимости этапа управления.

В общем виде коэффициент технической эффективности можно представить следующим образом (9):

$$P_{ТЭ}(t)=P_{ОГ}(t) \cdot \prod_{i=1}^n ((1-r_i)^{\omega_i})^w, \quad (9)$$

где n – количество используемых показателей эффективности;

r_i – коэффициенты снижения технической эффективности системы на различных этапах жизненного цикла от i -го воздействия (фактора);

ω_i – коэффициенты, характеризующие важность, значимость этапа жизненного цикла, $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$;

w – нормирующий коэффициент: $w = \max(\omega_i)$.

В предложенном виде техническая эффективность приобретает физический смысл как показатель сохранения работоспособности системы на всем протяжении срока службы. Коэффициент, определяющий качество проектирования, можно представить в виде произведения полученного выше безразмерного коэффициента топологической эффективности $K_{ЭТ РО}$, формула (4), и вероятности эвакуации $P_{Э}$: $K_{П} = K_{ЭТ РО} \cdot P_{Э}$, рассчитываемой при оценке величины ИПР. Весовые коэффициенты ω_i , зависящие от множества факторов, устанавливаемые с позиций значимости как заказчика, так и проектировщика,

могут быть определены методами математической статистики или методом экспертных оценок. Статистическая оценка в связи с недоступностью данных весьма затруднительна, поэтому для получения коэффициентов мы обратились к экспертному опросу. Степень согласованности мнений по каждой группе параметров, полученная методом ранговой корреляции, оказалась достаточно высока. Наибольшая согласованность мнений квалифицированных (61,25%) экспертов наблюдалась по важности этапа эксплуатации (94,8 %). Чтобы исключить случайность согласованности мнений экспертов, была проведена количественная оценка случайности с расчетом коэффициента конкордации или степени общей согласованности мнений экспертов по всем параметрам по критерию Пирсона, который составил 80 % с доверием 85%. Таким образом, полученные в результате опроса коэффициенты могут с высокой степенью доверия использоваться на практике. В работе обращено внимание на необходимость использования реальной структурной схемы СПЗ, отличающейся от используемой в нормативной методике, позволяющей не только более точно оценить, но и оптимизировать значение ИПР.

В пятой главе приведены результаты апробации предложенных методик, полученных при исследовании торгово-офисного здания (рисунок 3).

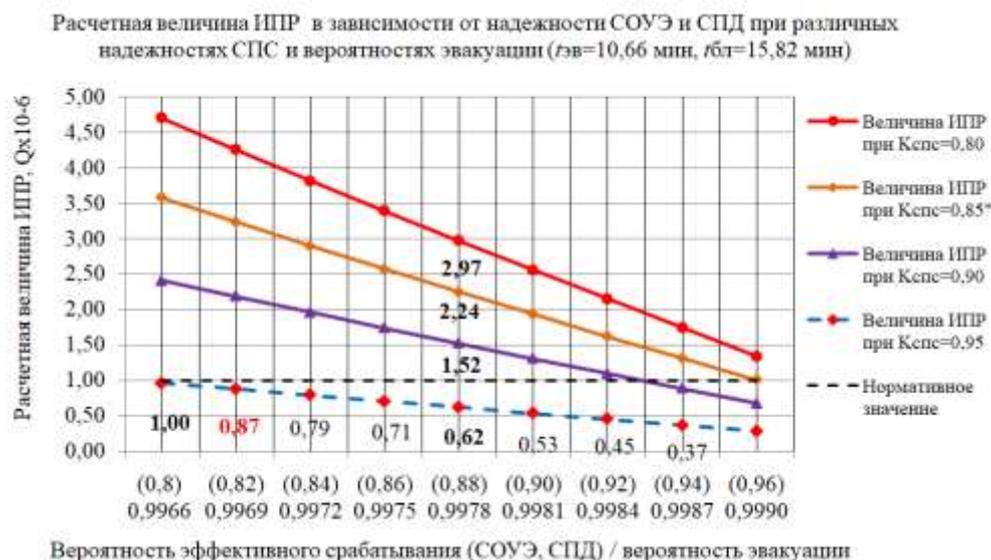


Рисунок 3 – Величина ИПР в зависимости от надежности СПЗ и СОУЭ

На основании актуальных входных данных для помещений 9-го этажа – коридоров, лифтовых холлов и подземной автостоянки – были выполнены ЭАР, расчеты разборчивости, определен коэффициент топологической эффективности ($K_{ЭТ_РО} = 0,917$), указывающий на необходимость проведения дополнительных акустических мероприятий. Расчет надежности технических средств применяемой СОУЭ 4 типа в совокупности с данным коэффициентом позволил определить коэффициент технической эффективности, $P_{ТЭ} = P_{ОГ}(t) \cdot K_{ЭТ_РО} = 0,96 \cdot 0,917 = 0,88$. С учетом применяемой на объекте системы пожарной автоматики (в которой СПС одновременно управляет системами пожаротушения (СПТ), дымоудаления (СПД) и СОУЭ) построен критерий для определения границ надежности СОУЭ (10):

$$K_{\text{СОУЭ}} > \frac{1 - \frac{10^{-6}}{Q_{\text{П}} \cdot P_{\text{ИПР}} \cdot (1 - P_{\text{Э}})} \cdot K_{\text{СПС}} \cdot (K_{\text{СПД}} + K_{\text{СПТ}} - K_{\text{СПД}} \cdot K_{\text{СПТ}})}{K_{\text{СПС}} \cdot (2 - K_{\text{СПД}} - K_{\text{СПТ}} + K_{\text{СПД}} \cdot K_{\text{СПТ}})}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{П}}$ – частота возникновения ОФП на объекте защиты;

$P_{\text{ИПР}}$ – вероятность присутствия людей;

$K_{\text{СПС}}, K_{\text{СПТ}}, K_{\text{СПД}}$ – коэффициенты соответствия СПС, СПТ, СПД нормативным требованиям по ПБ.

На рисунке 3 приведены зависимости величины ИПР от вероятности эвакуации при $P_{\text{Э}} < 0,999$ для различных значений $K_{\text{СПТ}}, K_{\text{СПС}}, K_{\text{СПД}}, K_{\text{СОУЭ}}$. Диапазон значений данных коэффициентов выбран с учетом статистических данных ВНИИПО и коэффициентов соответствия, методики расчета ИПР, рассчитанной надежности СОУЭ, $P_{\text{ОГ}} = 0,96$ и коэффициента технической эффективности СОУЭ, $P_{\text{ТЭ}} = 0,88$. Из полученных зависимостей видно, что при используемом (реальном) структурном построении СПЗ индивидуальный пожарный риск может быть обеспечен при надежности СПС не ниже 95 % и надежности СПТ (90%), СОУЭ и СПД не ниже 80 % (с доверием 85%). Точные границы можно определить лишь при учете надежности всего структурного построения СПЗ. Предложенные методики расчета позволят более точно оценить основные функциональные параметры СОУЭ определяющие надежность и эффективность структурного построения системы пожарной автоматики с целью оптимизации величины пожарного риска.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложены научно обоснованные методики электроакустических расчётов, расчета надежности и технической эффективности, а также методики построения и обоснования алгоритма функционирования СОУЭ, позволяющие повысить качество проектных решений и точность расчета величины ИПР.

2. Разработана методика расчёта коэффициента топологической эффективности и оценки речевой разборчивости, позволяющая обеспечить и оценить качество озвучивания защищаемых помещений; подобрать параметры и оптимизировать места размещения речевых оповещателей, сформировать оптимальный состав технических средств СОУЭ; разработать дополнительные акустические мероприятия, повышающие разборчивость речевых команд и инструкций персоналу, достоверность информации о путях эвакуации посетителям общественных и жилых зданий с целью сокращения времени задержки начала эвакуации. Экспериментально установлено, что данные, рассчитанные согласно вышеуказанной методике, соответствуют практическим измерениям. Степень отклонения расчетных уровней звукового давления от измеренных в исследуемом торгово-офисном центре не превосходит 1,5 %, что позволяет рекомендовать разработанную методику для практического использования.

3. Предложен и экспериментально подтвержден способ расчёта времени задержки начала эвакуации, использующийся в нормативной методике расчёта величины ИПР. Результаты теоретических расчётов согласно упрощенной модели движения людей в совокупности с предложенным способом расчета задержки

начала эвакуации для трехэтапного алгоритма эвакуации соответствуют практическим измерениям с точностью не менее 94 %. Таблично-информационное представление входных параметров в виде зон обнаружения пожара и выходных данных в виде последовательности и задержек включения зон оповещения предложено интегрировать в общую структуру ПБ объекта защиты – «Пожарная матрица». Разработанные алгоритмы поэтапной эвакуации и способы их обоснования позволят избежать скоплений и столкновений, сократить общее время эвакуации людей при пожаре.

4. Разработана и теоретически обоснована методика расчета обобщенного коэффициента технической эффективности СОУЭ, учитывающего надёжность и снижение работоспособности системы на всех этапах постпроизводственного цикла. Предложенный коэффициент как альтернатива безусловного коэффициента, используемого в нормативной методике со значением 80 %, позволяет более точно оценить величину ИПР. Значение коэффициента технической эффективности, рассчитанное для речевой СОУЭ IV типа, эксплуатируемой в исследуемом торгово-офисном центре, составило 88 %, что соответствует усредненным статистическим данным по работоспособности СОУЭ за период с 2013 по 2021 г.

5. Установлено, что для повышения точности расчёта величины ИПР необходимо учитывать не теоретическую, а практическую структуру пожарной автоматики. В качестве одного из эффективных способов расчета надежности СПЗ предложено использовать логико-вероятностный подход, позволяющий быстро и эффективно рассчитать величину надежности для любого структурного построения системы пожарной автоматики.

6. Показано, что использование функциональных параметров СОУЭ, рассчитанных по предложенным методикам, по сравнению с параметрами, используемыми в традиционных подходах, позволят повысить точность расчета величины ИПР более, чем в два раза. Предлагаемые теоретически значимые исследования будут востребованы для практического использования инженерами-проектировщиками СОУЭ, расчетчиками ИПР, монтажными и эксплуатирующими организациями при проверке работоспособности СОУЭ, сотрудниками надзорных органов при аудите объекта защиты, в научных и учебных целях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Кочнов О.В.** Результаты испытаний рупорных громкоговорителей ROXTON / О.В. Кочнов, А.В. Кочегаров, А.В. Мальцев, А.С. Мальцев // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России (Современные проблемы гражданской защиты). 2018. № 3. С. 27–32.

2. **Кочнов О.В.** Специфика проектирования систем оповещения / О.В. Кочнов, А.В. Кочегаров, А.В. Мальцев, А.С. Мальцев // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России (Современные проблемы гражданской защиты). 2018. № 1 (26). С. 64–70.

3. **Кочнов О.В.** Особенности применения акустических модулей в системах оповещения о пожаре и чрезвычайных ситуациях / О.В. Кочнов, М.А. Колбашов, А.А. Десницкий, А.В. Мальцев, А.А. Краснов // Современные проблемы гражданской защиты. 2021. № 1 (38). С. 60–66.

4. **Кочнов О.В.** Анализ и расчет надежности систем оповещения и эвакуации людей при пожаре для различных структурных построений / О.В. Кочнов, М.А. Колбашов, С.А. Савченко, В.Н. Князев, М.А. Хакимов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 144–153.

5. **Кочнов О.В.** Роль системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре в вопросе минимизации индивидуального пожарного риска / О.В. Кочнов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 136–143.

6. **Кочнов О.В.** Математическое моделирование при управлении системами противопожарной защиты объектов / О.В. Кочнов, А.В. Кочегаров, С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. 2023. Т. 16. № 4. С. 40–48.

7. **Кочнов О.В.** Аспекты определения эффективности систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре / О.В. Кочнов, А.Л. Никифоров, К.А. Новожилова // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 33–38.

8. **Кочнов О.В.** Оценка коэффициентов значимости этапов жизненного цикла СОУЭ на основании результатов экспертного опроса / О.В. Кочнов, А.Л. Никифоров, К.А. Новожилова // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 39–46.

Статьи в журналах, входящих в международную базу цитирования Web of Science:

9. **Kochnov O.** Structural construction optimization of fire protection systems / Kochnov O., Sazonova S., Kochegarov A., Korkunov P., Yemelyanov R. Modern Problems in Construction. Selected Papers from MPC 2022. Сер. «Lecture Notes in Civil Engineering», 2024. С. 417–428.

Публикации в иных научных изданиях:

10. **Кочнов О.В.** Основные подходы к построению обобщенной оценки эффективности систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре / О.В. Кочнов, А.Л. Никифоров // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 118–124.

Учебные и научные издания:

11. **Кочнов О.В.** Системы оповещения и проводной связи: учеб. пособие / А.С. Мальцев, О.В. Кочнов, А.М. Алешков [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. 118 с.

12. **Кочнов О.В.** Специфика проектирования систем проводного речевого оповещения: монография. Казань: Издательство «БУК», 2023. 312 с.