

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, вед. научн. сотр., НУГЗУ,
Р.И. Шевченко, к.т.н., с.н.с., нач. лаборатории, НУГЗУ,
А.Е. Басманов, д.т.н., профессор, главн. научн. сотр., НУГЗУ*

ВЫБОР ПОРОГОВ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА С ГРУППИРОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В соответствии с обобщенным байесовским критерием решена задача совместной оптимизации порогов для систем обнаружения и тушения пожара с группированием датчиков первичной информации. Исследована взаимная зависимость порогов от условий наблюдения фактора пожара и ожидаемый выигрыш от совместной оптимизации двух порогов в групповом датчике.

Ключевые слова: датчик первичной информации, система обнаружения и тушения пожара, групповой датчик обнаружения пожара, характеристики обнаружения пожара.

Постановка проблемы. Одним из основных направлений сокращения ущерба от пожаров является их своевременное обнаружение и запуск системы тушения пожара. Применение современных технических систем, использующих датчики первичной информации об опасных факторах пожара, сталкивается с проблемой ошибочной работы датчиков - наличия пропусков пожара и ложного срабатывания датчиков при его отсутствии. Одним из конструктивных решений данной проблемы является использование структурной избыточности, реализуемой путем объединения нескольких датчиков первичной информации в единый групповой датчик. При этом решение о наличии или отсутствии пожара в групповом датчике выносится на основе интегральной обработки информации от всех первичных датчиков группы. Отличительной особенностью группового использования датчиков является зависимость результирующего решения от двух порогов. Первый порог используется в первичных датчиках группы, а второй определяется при вынесении решения по результатам интегральной обработки информации первичных датчиков.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] рассмотрено применение структурной избыточности для повышения эффективности систем обнаружения пожара на основе комплексных датчиков и реализации мажоритарного принципа обработки информации от группы датчиков. Однако возможности снижения ошибочных решений там не рассматриваются. В работе [2] для снижения ошибочных решений комплексного датчика предложено использовать критерий максимума разности между вероятностями правильного и ложного срабатывания. Показано, что существует правило, в соответствии с которым имеется определенное число сработавших первичных датчиков

из заданной группы, при котором принятие решения о пожаре комплексным датчиком оказывается оптимальным в смысле выбранного критерия. Получено выражение, позволяющее определять оптимальное число сработавших датчиков первичной информации, но не рассмотрены вопросы выбора порога в первичных датчиках и его зависимость от общего числа первичных датчиков и принятого алгоритма мажоритарной обработки в групповом датчике.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является совместный выбор порогов в групповых датчиках при реализации мажоритарного принципа обработки информации и их оптимизация на основе обобщенного критерия Байеса.

Будем полагать, что датчики первичной информации (рис. 1) подвергаются воздействию некоррелированных случайных факторов $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$, ..., $\varepsilon_n(t)$, вследствие чего их срабатывание носит случайный и независимый характер.

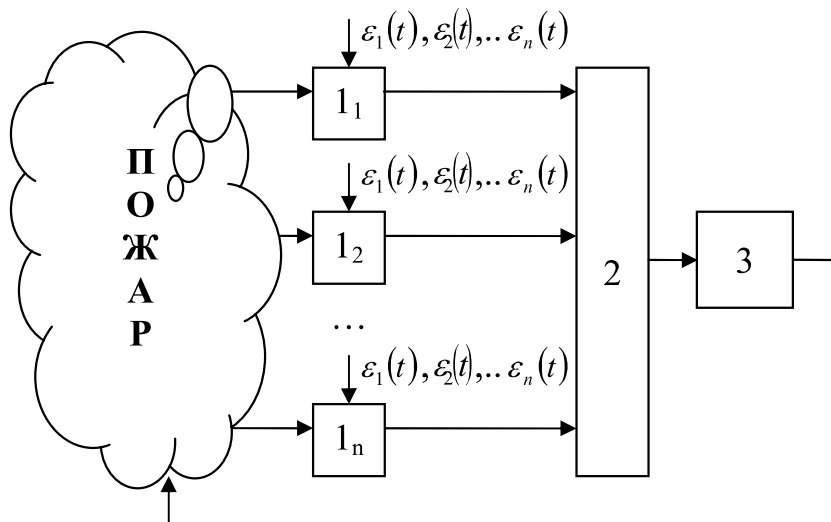


Рис. 1 – Структура группового датчика пожара: $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ – датчики первичной информации; 2 – устройство принятия решения о пожаре, реализующее мажоритарный алгоритм; 3 – система тушения пожара

Устройство принятия решений 2 реализовано таким образом, что при получении информации о срабатывании не менее k из n датчиков первичной информации, выдается сигнал, инициирующий систему тушения пожара.

Случайный характер наблюдаемых факторов пожара первичными датчиками приводит к двум видам ошибок первичной информации:

- ошибке первого рода – пропуск пожара при его наличии;
- ошибке второго рода – ложная тревога при отсутствии пожара.

При этом ошибки первичной информации будут трансформироваться в аналогичные ошибки группового датчика. Пусть для датчиков первичной информации вероятность ошибки первого рода составляет величину α , а вероятность ошибки второго рода - β . Тогда

вероятность p_α ошибки первого рода (пропуск) для группового датчика, характеризуемая отсутствием информации более чем от $n-k$ датчиков, будет определяться величиной

$$p_\alpha = 1 - \sum_{i=k}^n C_n^i (1-\alpha)^i \alpha^{n-i}, \quad (1)$$

При этом вероятность p_β ошибки второго рода (ложная тревога), характеризуемая срабатыванием не менее k датчиков, будет определяться величиной

$$p_\beta = \sum_{i=k}^n C_n^i \beta^i (1-\beta)^{n-i}. \quad (2)$$

В общем случае оптимизация числа k сработавших первичных датчиков, необходимых для принятия бинарного решения комплексным датчиком, должна производиться в соответствии с критерием Байеса, который определяет средний риск от ошибочных решений величиной

$$L = Ap_\alpha + Bp_\beta = A - \sum_{i=k}^n C_n^i [A(1-\alpha)^i \alpha^{n-i} - B\beta^i (1-\beta)^{n-i}] \rightarrow \min_k, \quad (3)$$

где A, B – обобщенные весовые коэффициенты: $A \geq 0, B \geq 0$. Весовые коэффициенты A, B могут определяться вероятностями сопутствующих ошибкам различных событий, а также стоимостью или ущербом ошибок и произведениями ущерба на вероятности соответствующих сопутствующих событий. Задача минимизации байесовского риска (3) эквивалентна задаче максимизации

$$\sum_{i=k}^n C_n^i [A(1-\alpha)^i \alpha^{n-i} - B\beta^i (1-\beta)^{n-i}] \rightarrow \max_k. \quad (4)$$

Пусть вероятность правильного обнаружения пожара первичными датчиками превосходит вероятность ложной тревоги $1-\alpha > \beta$. Следуя [2], максимум выражения (4) будет достигаться при значении k , равном ближайшему сверху к x_0 целому числу, но не большем n . Искомое значение x_0 определяется выражением

$$x_0 = \frac{\ln \frac{B}{A} + n \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \left(\frac{1-\alpha}{\beta} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} \right)}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что выбор числа k сработавших первичных датчиков, необходимых для оптимального решения в групповом датчике в смысле минимума байесовского риска (3), зави-

сит от вероятностей ошибок первичных датчиков информации, а также значений A и B обобщенных весовых коэффициентов. Выбору обобщенных весовых коэффициентов и их влиянию на величину оптимального числа k первичных датчиков при фиксированных значениях α и β посвящена работа [3].

При этом вероятности ошибок α и β первичных датчиков существенно зависят от статистики наблюдаемых факторов пожара с учетом мешающих факторов и выбранного порога. В этой связи представляется интересным принцип совместного выбора порогов в первичных датчиках и для мажоритарной обработки информации.

Пусть статистика произвольного фактора T пожара на входе порогового устройства первичного датчика для фиксированного момента времени описывается гауссовой плотностью вероятности. Тогда в случае пожара на входе порогового устройства будет действовать аддитивная смесь $T = T_p + \varepsilon$ истинного значения T_p фактора пожара и сопутствующих независимых случайных факторов ε , характеризуемых нулевым средним и дисперсией σ^2 . Если пожар отсутствует, то на входе порогового устройства первичного датчика смесь будет действовать смесь $T = \varepsilon$, которая обусловлена только воздействием сопутствующих факторов. Будем полагать, что статистика наблюдаемого фактора T в случае пожара определяется плотностью $P_1(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(T-T_p)^2}{2\sigma^2}}$, а при его отсутствии - $P_0(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}}$. Тогда вероятности ошибок α и β первичного датчика при заданном пороге u будут определяться соответственно:

$$\alpha(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(T-T_p)^2}{2\sigma^2}} dT \quad \text{и} \quad \beta(u) = \int_u^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}} dT. \quad (6)$$

С учетом (6) средний байесовский риск решения для группового датчика будет определяться функционалом

$$L(k, n, u) = Ap_\alpha(k, n, u) + Bp_\beta(k, n, u) \rightarrow \min_{n, k, u}, \quad (7)$$

где $p_\alpha(k, n, u) = 1 - \sum_{i=k}^n C_n^i (1 - \alpha(u))^i \alpha(u)^{n-i}$, а $p_\beta(k, n, u) = \sum_{i=k}^n C_n^i \beta^i(u) (1 - \beta(u))^{n-i}$.

В общем случае оптимизация группового датчика в соответствии с критерием (7) должна производиться совместно по общему числу n используемых датчиков в группе, требуемому числу k сработавших из них и порогу u для первичных датчиков. На практике общее число n первичных датчиков в группе является заданной величиной. Тогда совместной оптимизации подлежат пороги k и u . В качестве примера на рис. 2 приведен примерный вид поверхности в простран-

стве порогов, определяемой функционалом (7), для фиксированного числа $n = 20$ первичных датчиков в условиях статистики наблюдений, характеризуемой фактором пожара $Tr = 30$ (условных единиц фактора) и среднееквдратическим значением $\sigma = 15$ (условных единиц фактора) мешающего фактора пожара.

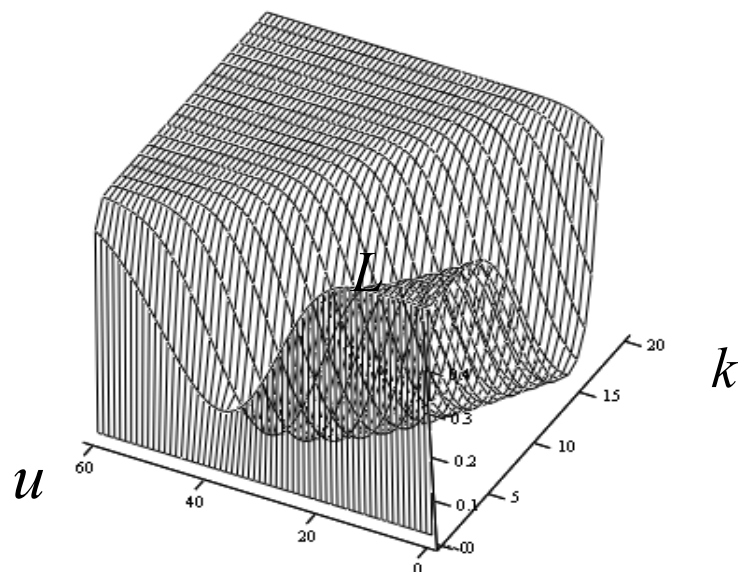


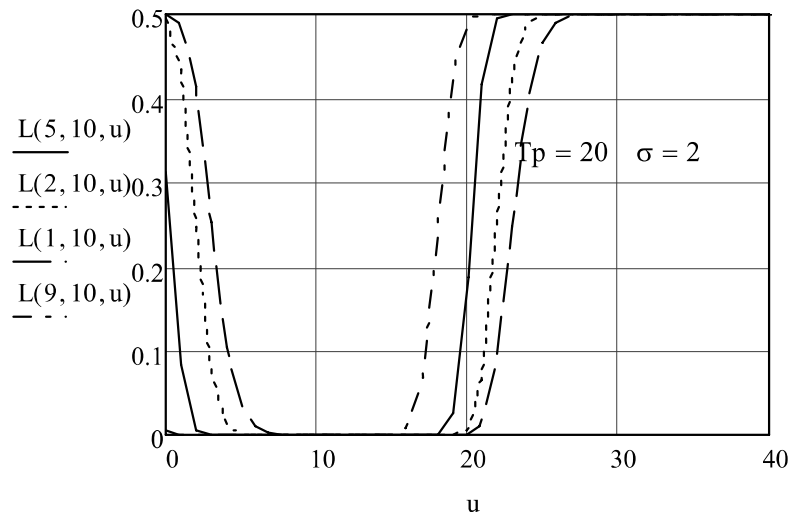
Рис. 2 – Зависимость среднего риска от числа k сработавших датчиков и порога u срабатывания

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для группового датчика минимум среднего риска (7) зависит от реализуемого мажоритарного правила « k/n » и величины порога u срабатывания в первичных датчиках. Поэтому оптимизация мажоритарного правила « k/n » в групповом датчике должна сопровождаться выбором соответствующего порога срабатывания для первичных датчиков. При этом, следуя (7), величина порога определяется статистикой наблюдаемого фактора пожара и сопутствующих факторов. В общем случае решение задачи оптимизации параметров группового датчика будет зависеть от статистики наблюдаемого фактора пожара и мешающих наблюдению сопутствующих факторов. На рис. 3 приведены данные, иллюстрирующие этот факт.

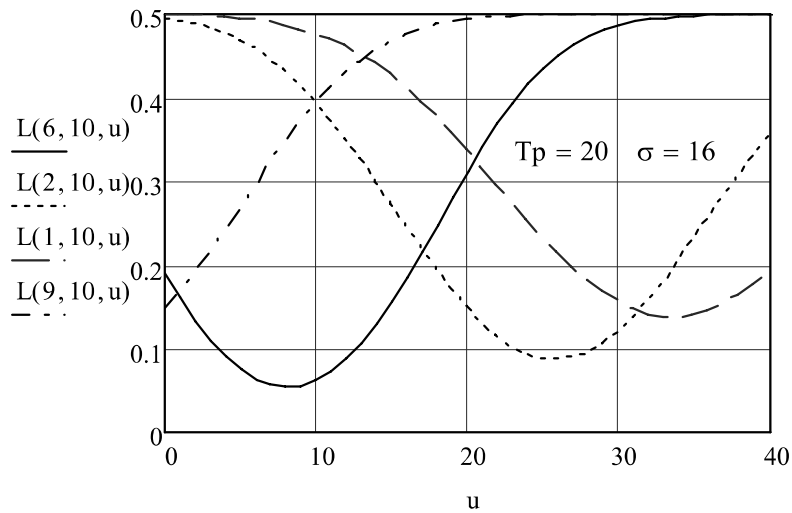
Данные на рис. 3-а соответствуют изменению порога в первичных датчиках при малом уровне мешающих факторов для различных правил « k/n » и общем числе датчиков $n = 10$, а на рис.3-б при существенном уровне мешающих факторов по сравнению с наблюдаемым фактором пожара.

Приведенные зависимости свидетельствуют о необходимой коррекции порогового уровня срабатывания первичных датчиков и тем существенней, чем выше уровень мешающих факторов. Например, для рассматриваемого оптимального правила « $k = 6/n = 10$ » порог u при уровне мешающих факторов $\sigma = 16$ должен составлять величину порядка $Tr/2$. При выборе порога равного Tr вероятность полной ошиб-

ки решения оказывается почти в 6 раз больше. При меньшем уровне мешающих факторов выигрыш оказывается более существенным.



а)



б)

Рис. 3 – Зависимость среднего риска от величины порога u первичных датчиков для различных правил « k/n » и уровней мешающих факторов в области обнаружения пожара

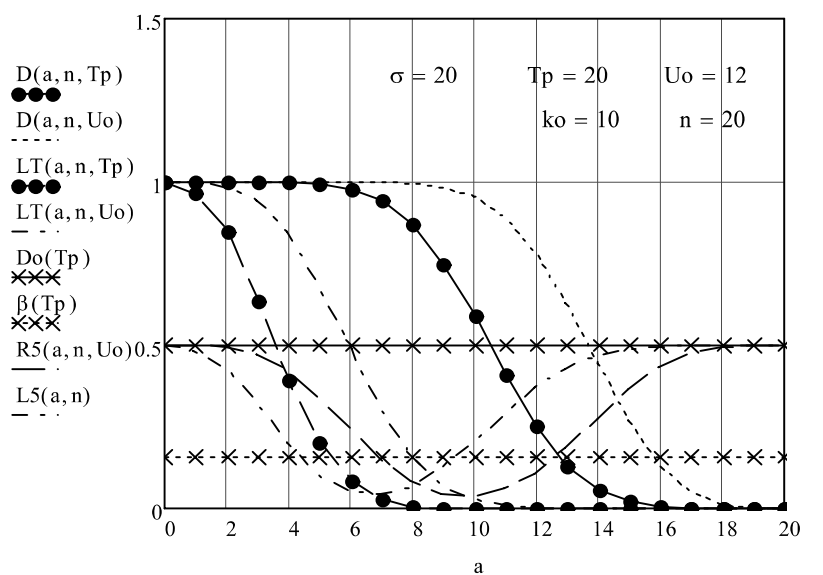
Основные показатели качества обнаружения в различных условиях наблюдения фактора пожара, для двух типов оптимизированных групповых датчиков (оптимизированного только по порогу k и оптимизированного по двум порогам k и $u=a$) при общем числе первичных датчиков, равном 20, приведены на рис.4.

Данные на рис. 4-а соответствуют условиям наблюдения, характеризуемым величиной $Tp/\sigma=1$, а на рис. 4-б - величиной $Tp/\sigma=2$. Здесь величина U_0 определяет результат совместной оптимизации (по параметрам k и $a=u$) порога для первичных датчиков, а через $D(\cdot)$ и $LT(\cdot)$ обозначены соответственно функционалы вероятности

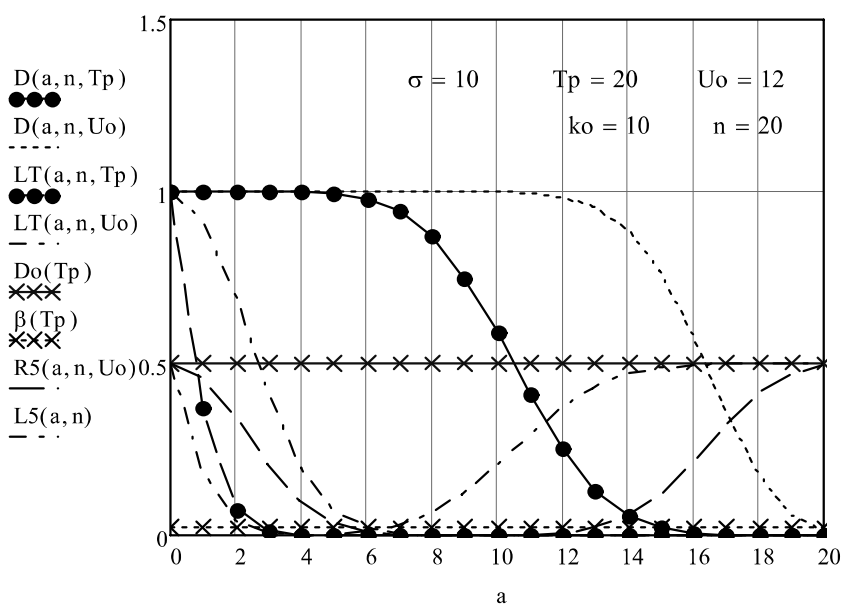
правильного обнаружения пожара и ложной тревоги для рассматриваемых групповых датчиков.

Для сравнения на рис. 4 приведены значения вероятностей правильного обнаружения $D(Tp)$ пожара и ложной тревоги $\beta(Tp)$ для первичного датчика и зависимости функционалов среднего риска $R5(\cdot)$ и $L5(\cdot)$ от параметра $u = a$ для группового датчика с оптимизированным порогом U_0 в первичных датчиках и с фиксированным порогом, соответствующим заданным значениям $D(Tp)$ и $\beta(Tp)$.

Из анализа зависимостей на рис. 4 следует, что показатели качества обнаружения в групповом датчике, оптимизированном по двум порогам, существенно выше.



а)



б)

Рис. 4 – Характеристики обнаружения группового датчика для различных условий наблюдения фактора пожара

При этом имеет место рост показателей обнаружения с увеличением отношения Tp/σ . Например, при отношении $Tp/\sigma = 1$ вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для оптимизированного по двум порогам группового датчика составляет соответственно 0,954 и 0,026. При этом аналогичные характеристики обнаружения для группового датчика, оптимизированного только по порогу k , составляют соответственно 0,942 и 0,029, а для первичного датчика - 0,5 и 0,159.

При отношении $Tp/\sigma = 2$ вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для оптимизированного по двум порогам группового датчика уже составляют соответственно 0,999 и $2,504 \times 10^{-5}$, а для группового датчика, оптимизированного только по порогу k , соответственно 0,999 и $9,691 \times 10^{-4}$. Это означает, что оптимизированный по двум порогам групповой датчик обеспечивает на порядок меньшую вероятность ложной тревоги при одинаковой вероятности правильного обнаружения, равной 0,999. При этом увеличение величины Tp/σ приводит к еще большему выигрышу в рассматриваемых показателях качества обнаружения.

Выводы. В соответствии с обобщенным байесовским критерием решена задача выбора оптимального количества датчиков первичной информации, входящих в групповой датчик, при срабатывании которых производится инициация системы тушения пожара. Показано, что выбор оптимального порога в первичных датчиках связан с правилом мажоритарной обработки информации, реализуемым в групповом датчике. Решена задача совместной оптимизации двух порогов в групповом датчике. Исследована зависимость порога первичных датчиков от используемого мажоритарного правила и условий наблюдения фактора пожара. Произведена оценка ожидаемого выигрыша от совместной оптимизации двух порогов в групповом датчике, которая показала ее достаточную эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Повышение эффективности обнаружения пожара по температуре / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь, Е.А. Тищенко. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 129 с.
2. Поспелов Б.Б. Оптимальный выбор количества пожарных извещателей в системе защиты резервуара с нефтепродуктом / Б.Б. Поспелов, А.Е. Басманов, А.А. Михайлюк, Я.С. Кулик // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С. 12-15.
3. Поспелов Б.Б. Структурный метод повышения надежности датчиков первичной информации в системе ослабления последствий чрезвычайной ситуации / Б.Б. Поспелов, А.Е. Басманов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вип. 14. – С. 129-134.

Б.Б. Поспелов, Р.І. Шевченко, О.Є. Басманов

Вибір порогів у системах виявлення і гасіння пожежі з групуванням датчиків первинної інформації

Відповідно до узагальненого байесовського критерію вирішена задача сумісної оптимізації порогів для систем виявлення і гасіння пожежі з групуванням датчиків первинної інформації. Досліджена взаємна залежність порогів від умов спостереження чинника пожежі та очікуваний вигреш від сумісної оптимізації двох порогів у груповому датчику.

Ключові слова: датчик первинної інформації, система виявлення і гасіння пожежі, груповий датчик виявлення пожежі, характеристики виявлення пожежі.

B.B. Pospelov, R.I. Shevchenko, A.E. Basmanov

Choice of thresholds in systems of detection and extinguishing fire with grouping of sensors the primary information

In accordance with the generalized bayes criterion the task of joint optimization of thresholds is decided for the systems of detection and extinguishing of fire with grouping of sensors of primary information. Mutual dependence of thresholds on the terms of supervision of factor of fire and expected effect is explored of joint optimization two the thresholds in a group sensor.

Keywords: sensor of primary information, system of detection and extinguishing of fire, group sensor of detection of fire, descriptions of detection of fire.