

---

**УДК 614.8+519.85**

*В.М. Комяк, д-р техн. наук, профессор, НУГЗУ,  
А.Г. Коссе, канд. техн. наук, доцент, НУГЗУ*

**МОДЕЛЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЖАРНЫХ ДЕПО В  
УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК  
СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ**

В работе выделяются, формализуются ограничения задачи размещения пожарных депо в сельской местности, строится математическая модель размещения и исследуются ее особенности.

**Ключевые слова:** математическая модель, пожарные депо, неоднородность характеристик сельской местности.

**Постановка проблемы.** Роль села в развитии общества по-прежнему остается значительной, поскольку в сельской местности проживают около 30% населения. В последнее время число проблем социального, экономического и экологического характера увеличивается. Одной из проблем является пожарное обеспечение жизнедеятельности сёл.

В связи с экономическими реформами произошли изменения в структуре предприятий аграрного сектора: наблюдается разукрупнение больших хозяйств, образуются фермерские хозяйства. На балансе больших хозяйств находились отделения пожарной охраны, а в связи с изменением структуры хозяйства произошло разрушение старой системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ) сельской местности. Поэтому в настоящее время актуальными являются вопросы определения рациональных параметров СОПБ современного села, среди которых одними из основных являются экономически обоснованное количество пожарных депо (ПД) и места их рационального размещения.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Существующие работы [1, 2] обосновывают некоторые параметры пожарной защиты при существующей схеме размещения пожарных депо и не могут быть использованы для обоснования новых мест размещения в условиях развития СОПБ, либо обоснование основано на нормах, которые разработаны для городов и не могут быть перенесены на населенные пункты сельской местности [3, 4]. Так, работы по определению рационального количества и мест размещения для городов [3, 4] используют либо такие нормы как радиус круга защиты для ПД [3] и решают задачу покрытия города кругами нормированного радиуса, либо нормированное время прибытия на пожар [4].

**Постановка задачи и ее решение.** Предлагаемая работа является развитием работ по размещению ПД и учитывает существенную неоднородность сельской местности, а именно: 1) населенные пункты по территории района размещены, как правило, неравномерно; 2) численность жителей отдельных сельских населенных пунктов существенно отличаются; 3) районные центры, где, как правило, размещаются пожарные депо, не всегда находятся в географическом центре административного района; 4) существующая сеть дорог развита в направлении соединения населенных пунктов с районным центром, в то же время дороги соединения между отдельными населенными пунктами недостаточно развиты. Для сельской местности нормы, разработанные для городов неприменимы. Исходя из перечисленного, поставлена задача разработать подход к обоснованию оптимального количества пожарных депо и мест их размещения для населенных пунктов сельской местности.

Содержательная постановка задачи. Необходимо, исходя из экономической целесообразности в рамках выделяемых средств, определить параметры пожарной защиты административного района (количество ПД и параметры их размещения в населенных пунктах района с соответствующими зонами защиты), при которых время достижения возможного очага пожара будет минимальным. При решении задачи необходимо учесть ряд ограничений по: плотности населения; плотности застройки; количеству и параметрам размещения объектов повышенной пожарной опасности; качеству сети дорог, связывающих населенные пункты; соблюдению минимально-допустимых нормированных расстояний между зданиями ПД и зданиями жилого и производственного сектора; условиям размещения ПД в области, занимаемых населенным пунктом.

Для обоснования метода решения задачи необходимо построить математическую модель размещения ПД.

Пусть имеется административный район с населенными пунктами  $S_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ), в которых размещены ПД  $S_i$  ( $i=1,\dots,p$ ) ( $\{S_i\}_{i=1}^p \subset \{S_j\}_{j=1}^N$ ), и областями запрета  $S_t$  ( $t=1,2,\dots,m$ ). Населенные пункты связывает сеть дорог, которую представим в виде планарного графа  $\Gamma$ , вершинами которого являются населенные пункты (перекрестки), а ребрами – участки дорог ними. Представим район в виде геометрического объекта  $S^0$ .  $S^0$  - это геометрический объект со следующими компонентами геометрической информации:  $\{s^0\}$  - многосвязная область, которая представляется комбинацией (объединением, пересечением, разностью) многоугольников

$S^0 = (S_0 \setminus \bigcup_{t=1}^m S_t), S_j \subset S^0, j = 1, \dots, N; \{S_i\}_{i=1}^p \subset \{S_j\}_{j=1}^N$ ; компонента

$m_0 = \{m_0^1; m_0^2\}, m_0^1$  - набор последовательностей координат вершин многоугольников соответственно в собственных системах координат  $xOy, xO_t y, xO_j y, xO_i y, m_0^2$  - информация о графе;  $v_0$  - параметры размещения  $O\{x_0, y_0\}$ , которые совпадают с началом  $R^2$ , т.е. имеют нулевые значения,  $O_t(x_t, y_t), O_j(x_j, y_j), O_i(x_i, y_i)$  - соответственно параметры размещения объектов  $S_t (t = 1, 2, \dots, m), S_j (j = 1, 2, \dots, N), S_i (i = 1, \dots, p)$  в системе координат  $xOy$ .

Пусть номера населенных пунктов образуют множество  $J\{1, 2, \dots, N\}$ . Разобьем множество  $J\{j\}_{j=1}^N = \{1, 2, \dots, N\}$  на  $n (n \geq p)$  подмножеств

таким образом, что

$$J_1 \{j_{j_1}\}_{j_1=1}^{N_1}, J_2 \{j_{j_2}\}_{j_2=1}^{N_2}, \dots, J_i \{j_{j_i}\}_{j_i=1}^{N_i} = \{j_1, \dots, j_i, \dots, j_{N_i}\}, \dots, J_n \{j_{j_n}\}_{j_n=1}^{N_n},$$

$$N_1 + N_2 + \dots + N_n = N, \quad J_1 \subset J, J_2 \subset J, \dots, J_n \subset J, \quad \text{т.е.}$$

$$J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_n = J, \quad \forall i, j = 1, \dots, N, J_i \cap J_j = \emptyset \text{ и из каждого } i\text{-того}$$

подмножества выберем элемент  $j_i \in J_i$ , определяющий параметры ПД  $(m_i, x_i, y_i) | (x_i, y_i) \in S_i \subset S_j, j = 1, \dots, N$  так, чтобы область защиты, образуемая при размещении ПД в выбранную точку  $(x_i, y_i)$ , т.е. связная область  $S_{j_i}(m_{j_i}, x_i, y_i)$ , покрыла населенные пункты, номера которых определяет множество  $J_i$ .

Возникает следующая комбинаторная задача.

Из условий избыточности (экономической оправданности) найти такое  $n$  (количество ПД) и из множества подмножеств  $C_N^{n-p}$  найти такое подмножество номеров населенных пунктов  $\{j_1^*, \dots, j_p^*, j_{p+1}, \dots, j_n\}$  с соответствующими зонами защиты с номерами  $J_1, J_2, \dots, J_n$ , чтобы при размещении в перечисленные населенные пункты ПД время  $T$  достижения возможного очага пожара  $(x_{p_i}, y_{p_i})$  по сети дорог было минимальным при выполнении ограничений задачи (параметры со звездочками – фиксированные номера населенных пунктов с существующими ПД).

Построена математическая модель задачи, как задача дискретного программирования на множестве сочетаний.

Необходимо определить

$$T(\alpha^*) = \min_{\alpha \in A} T(\alpha), \quad (1)$$

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha \in A} T(\alpha), \quad (2)$$

где  $A$  – комбинаторное множество подмножеств из вещественных чисел  $\{n, j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ,  $T$  – заданный на  $A$  функционал.

Осуществим погружение множества  $A$  в арифметическое евклидово пространство  $R^{n-p+1}$  (переход от дискретной к непрерывной задаче). Под погружением множества  $A$  в  $R^{n-p+1}$  понимается следующее взаимно однозначное отображение  $f$ :

$$\begin{aligned} f : A &\rightarrow R^{n-p+1}, \forall \alpha = (n, j_1^*, \dots, j_p^*, j_{p+1}, \dots, j_n) \in A, \\ u = f(\alpha) &= (n, u_1^*, \dots, u_{p+1}^*, u_{p+1}, \dots, u_n) \in W \subset R^{n-p+1}, u_i = j_i, i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u_i = (m_{j_i}, m_i, x_i, y_i)$ ,  $j_i \in J_i(j_1, j_2, \dots, j_i, \dots, j_{N_i})$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Построена математическая модель непрерывной задачи, для чего формализованы ее ограничения.

Рассмотрим объект  $S_{j_i}(m_{j_i}, x_i, y_i)$  ( $i$ -тую область защиты с населенными пунктами  $\{S_{j_i}(x_{j_i}^{j_i}, y_{j_i}^{j_i})\}_{j_i=1}^{N_i}$ ). Условие покрытия населенных пунктов областью защиты можно записать с помощью  $\Phi$ -функции, определенной в работах Стояна Ю.Г., как непересечение объектов  $R^2 \setminus S_{j_i}(m_{j_i}, x_i, y_i)$  и  $\{S_{j_i}(x_{j_i}^{j_i}, y_{j_i}^{j_i})\}_{j_i=1}^{N_i}$ : которая всегда неотрицательна при выполнении условий их непересечения или их касания:

$$\left[ \begin{aligned} &\Phi(m_{j_i}, x_i, y_i, x_{j_i}^{j_i}, y_{j_i}^{j_i}) \geq 0, \\ &\dots\dots\dots \\ &\Phi(m_{j_i}, x_i, y_i, x_{N_i}^{j_i}, y_{N_i}^{j_i}) \geq 0. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

В работе ограничения (4) определяют область допустимых решений  $W_5^i$ , обозначим  $W_5 = \bigcup_i W_5^i$ .

Пусть существует план застройки населенного пункта  $S_{j_i}(x_{j_i}^{j_i}, y_{j_i}^{j_i})$  зданиями  $S_t(t=1, \dots, l)$ . Перечисленные выше здания разобьем на две группы: здания, которые можно сносить для размещения на их месте зданий ПД,  $S_t(t=1, \dots, l_1)$  и здания, запрещенные к

сносу  $S_t^*(t=1, \dots, l_2), l_1 + l_2 = 1$ . Пусть в населенном пункте имеются также области запрета  $S_t (t = 1 + 1, \dots, q)$ .

Условие размещения объекта  $S_i (m_i, x_i, y_i)$  в области  $(S_{j_i} \setminus (\bigcup_{t=1}^{l_2} S_t^*) \setminus (\bigcup_{t=1+1}^q S_t))$  с учетом минимально-допустимых расстояний  $l_{it}, l_{i0}$  в рамках средств  $C$ , описывает следующая система, которая определяет область допустимых решений  $W_1$ :

$$\begin{cases} \Phi_{1t}(m_i, x_i, y_i, x_t, y_t) \geq l_{it}, t = 1, \dots, l_2 + q; \\ \Phi_{i0}(m_i, x_i, y_i, x_{j_i}^{J_i}, y_{j_i}^{J_i}) \geq l_{i0}; \\ R_1(m_i, x_i, y_i) \leq C \end{cases} \quad (5)$$

Аналогично строится область допустимых решений  $W_2$ , описывающая условие размещения объекта  $S_i (m_i, x_i, y_i)$  в области  $(S_{j_i} \setminus (\bigcup_{t=1}^1 S_t^*) \setminus (\bigcup_{t=1+1}^{q_1} S_t))$ ,  $q_1 = q - q_2$ , где  $S_t (t = 1 + 1, \dots, q_2)$  - области запрета, которые с учетом дополнительных средств на их освоение могут быть использованы для строительства на их месте ПД.

Некоторые здания  $S_e^* (t = 1, \dots, M) \in \{S_t\}_{t=1}^{l_1}$  рассматриваемого населенного пункта могут быть переоборудованы под ПД. Условие размещения объекта  $S_i (m_i, x_i, y_i)$  на множестве точек  $S_e^* (t = 1, \dots, M) \in \{S_t\}_{t=1}^{l_1}$  определяет область допустимых решений  $W_3$ .

Набор местоположений объекта  $S_i (m_i, x_i, y_i)$  соответственно на месте сносимых зданий, на территории освоенной земли, на множестве переоборудованных зданий определяется из области допустимых решений  $W_4 = W_1 \times W_2 \times W_3$ .

Рассмотрим и разметим граф  $\Gamma$ . Для этого каждому ребру ставим в соответствие скорость движения, расстояние между перекрестками и вес, определяющий пожарную опасность прилегающей территории. Вес - это свертка, составляющими которой является количество объектов повышенной пожарной опасности прилегающей территории, отнесенное к общему количеству таких объектов; численность населения, отнесенная к общей численности населения с соответствующими коэффициентами.

Экономическая оправданность – это не превышение затрат на содержание ПД над виртуальной прибылью, полученной за счет сохранения ценностей, достигнутой за счет уменьшения времени прибытия на пожар. В работе формализовано это понятие в виде:

$$C^1 \Delta t_n M - \sum_{i=p+1}^n C_i \geq 0, \quad (6)$$

где  $\Delta t_n = t_p - t_n$ ;  $t_n = \max_{i \in 1, \dots, n} t_i$ ,  $t_p = \max_{i \in 1, \dots, p} t_i$  -

соответственно время реагирования при наличии  $n, p$  зон зашит, определяемое на графе,  $C^1$  - математическое ожидание ущерба задержки на единицу времени на один пожар,  $M$  - математическое ожидание пожаров в год,  $C_i$  - затраты на содержание одного пожарного подразделения в год.

Функция цели – время движения от ПД до возможного очага пожара. Это время зависит от месторасположения ПД, метрических характеристик пожарных зон защиты и земельных участков для ПД.

Таким образом, возникает следующая задача комбинаторной оптимизации в евклидовом пространстве, которая эквивалентна задаче (1)-(2). В рамках имеющихся ресурсов  $C$ , исходя из экономической целесообразности, необходимо определить такое количество  $n$  пожарных подразделений и такие их параметры размещения  $(x_{j_i}^*, y_{j_i}^*), i = p + 1, \dots, n$  на множестве населенных пунктов и метрические характеристики соответствующих пожарных зон защиты, земельных участков под ПД  $m_{j_i}, m_i, i = p + 1, \dots, n$ , чтобы время достижения возможного очага пожара было минимальным при максимизации меры покрытия зонами защиты области  $S^0$ .

Необходимо найти

$$T^*(u^*) = \min_{u \in W \subset R^{4(n-p)+1}} T(u) = \min_{u \in W \subset R^{4(n-p)+1}} \{ \max_i [ \min_{u_i \in W_4} ( \max_{P_i} T_{ip_i}(u_i) ) ] \} \quad (7)$$

где  $T_{ip_i}(u_i) = T_{ip_i}(m_{j_i}, m_i, x_i, y_i) = \min_{l \in L_{ip}} t(l)$  минимальное время

движения от пожарного депо с параметрами размещения  $(x_i, y_i)$  до возможного очага пожара  $(x_{p_i}, y_{p_i})$ , которое затрачивают оперативные отделения, на множестве путей движения  $L_{ip}$ , составленном из линейных участков трассы и перекрестков в области защиты  $S_{j_i}(m_{j_i}, x_i, y_i)$ ,

$$u = f(\alpha) = (n, m_{j_{p+1}}, m_{p+1}, x_{p+1}, y_{p+1}, \dots, m_{j_n}, m_n, x_n, y_n), T(u) = F(\alpha),$$

а область  $W$  описывает ограничения задачи. Второй критерий – максимизация меры покрытия входит в ограничения задачи.

Рассмотрим особенности задачи (7). Мощность комбинаторного множества сочетаний равна  $K = \sum_{j=1}^{n-p} C_N^j$ ; задача (7) имеет дискретно-непрерывную структуру, т.е. каждой точке комбинаторного множества сочетаний ставится в соответствие вариант размещения  $n$  пожарных депо на множестве населенных пунктов с выделением их зон защит; область допустимых решений  $W$  ограничена, невыпукла, несвязна, каждая компонента которой может быть многосвязной; функция цели  $T(u)$  - время движения, исследуемое на множестве путей движения  $L_{ip}$  задается алгоритмически.

В работе [5] разработан подход к решению поставленной задачи на примере республики Азербайджан.

**Выводы.** Учет особенностей задачи потребовал формализации дополнительных ограничений и построения области допустимых решений и как следствие - создание новой математической модели для разработки обоснованных подходов к решению задач размещения ПД.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства / [Н.Н. Брушлинский, В.В. Кафидов, В.И.Козлачков и др.]; под ред. Н.Н.Брушлинского. – М.: Стройиздат, 1988. – 413 с.

2. Басманов О.Є. Математична модель розрахунку радіусу і площі обслуговування пожежними підрозділами в сільській місцевості / О.Є. Басманов, С.С. Говаленков // Проблеми пожарной безопасности – Х.: «Фолио», 2002. – Вып. 12. – С. 24-27.

3. Коссе А.Г.. Метод раціонального розміщення пожежних депо при проектуванні та оновленні районів міста: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : 21.06.02 «Пожежна безпека» / А.Г. Коссе. – Х., 2002. – 19 с.

4. Комяк В.М. Моделювання задач розбивання з урахуванням розповсюдження рівномірних характеристик на точкових множинах / В.М. Комяк, О.М. Соболев // Системні технології. - Дніпропетровськ: ДНВП «Системні технології». - 2006. – Вип. 2 (43) – С. 107-111.

5. Кязімов К.Т. Геометричне моделювання розміщення пожежних підрозділів в сільській місцевості на прикладі Азербайджану:

автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.01.01  
«Прикладна геометрія, інженерна графіка» / К.Т. Кязімов. – К., 2010.  
– 24 с.

nuczu.edu.ua

В.М. Комяк, А.Г. Коссе

**Модель розміщення пожежних депо в умовах неоднорідності характеристик сільської місцевості.**

В роботі виділяються, формалізуються обмеження задачі розміщення пожежних депо в сільській місцевості, будується математична модель розміщення та досліджуються її особливості.

**Ключові слова:** математична модель, пожежні депо, неоднорідність характеристик сільської місцевості.

V.M. Komyak, A.G. Kosse

**Model placement fire department in nonuniformity characteristics of rural**

The paper highlighted on the problem of placing restrictions formalized fire department in rural areas, built a mathematical model placement and investigated its characteristics.

**Keywords:** mathematical model, fire department, the heterogeneity of rural characteristics.