

М.М. Данилов, А.Н. Денисов
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: mmdaniloff@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ В РЕЗЕРВУАРЕ С ДВОЙНОЙ СТЕНКОЙ

Проведён анализ оперативно-тактических действий пожарных подразделений при тушении пожара в резервуаре с двойной стенкой. Предлагаются методы решения задачи управления оперативно-тактическими действиями подразделений.

Ключевые слова: пожаротушение, оперативно-тактические действия, двустенный резервуар.

М.М. Danilov, A.N. Denisov

SIMULATION OF FIRE FIGHTING BY MEANS OF MOBILE APPLIANCES IN DOUBLE WALL TANK

The analysis of operational and tactical actions of fire units during extinguish the fire in double wall tank. The methods of solving the problem of management of operational and tactical actions of units is offered.

Key words: fire fighting, operational and tactical actions, double wall tank.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 7 августа 2014 г.

Эффективность проведения *оперативно-тактических действий (ОТД)* пожарных подразделений при тушении пожаров в резервуарах во многом определяется решениями, связанными с определением соотношения таких составляющих системы пожаротушения мобильными средствами, как резервуар, силы пожаротушения и материально-технические ресурсы.

Компьютерная система поддержка принятия решений (КСППР) на месте пожара необходима для определения соотношений в системе пожаротушения в резервуарах и основана на моделировании, а также оптимизации её функционирования.

Функционирование системы организации ведения ОТД в *резервуаре с двойной стенкой (РВСЗС)* можно описать совместным функционированием однородных групп её элементов. В общем виде динамика функционирования системы пожаротушения мобильными средствами как определённого вида ОТД при тушении пожара в резервуаре может быть описана векторным процессом $VD(t)$ с зависимыми составляющими:

$$VD(t) = \{VD_1^r(t), VD_2^r(t), VD_3^r(t)\},$$

где $VD_1^r(t)$ – целочисленный процесс (тушение порошком, пеной, газом и т.п.), r – вид ОТД при тушении пожара в резервуаре;

$VD_2^r(t)$ – целочисленный процесс, описывающий действия сил пожаротушения, r – назначение (функции) сил пожаротушения;

$VD_3^r(t)$ – целочисленный процесс, описывающий функционирование материально-технических ресурсов, r – вид материально-технических ресурсов.

Взаимодействие составляющих (и их оптимизация) процесса $VD(t)$ в общем случае определяется тем, что их интенсивности переходов зависят не только от своих собственных характеристик, но и от характеристик других составляющих $VD_i(t)$ [1]. Оптимизация ведения ОТД системы пожаротушения мобильными средствами в резервуаре может быть сформулирована в рамках общей задачи принятия управленческого решения [2]. Очевидно, что параметрами оптимизации могут быть определяющие соотношение в системе пожаротушения численности позиций на тушение, людских и материально-технических ресурсов.

Рассмотрим теперь принципиальную реализацию КСППР применительно к РВСЗС.

При описании функционирования системы пожаротушения предположим, что модель функционирования системы пожаротушения хранится в КСППР. Необходимо описать одновременную работу нескольких её частей. Функционирование такой системы может быть описано векторным процессом $VD(t)$ с зависимыми составляющими целочисленного процесса:

$$VD(t) = \{VD(T)_1(t), VD(T)_2(t), VD(T)_3(t), VD(T)_4(t)\}, \quad (1)$$

где $VD_1(t)$ – протекание пожара в резервуарном парке;

$VD_2(t)$ – ОТД при тушении пожара в РВСЗС;

$VD_3(t)$ – функционирование нерасходуемого ресурса;

$VD_4(t)$ – функционирование (расходование) расходуемого материала, считая что каждая из составляющих процесса пожаротушения $VD(t)$ является однородным разложением целочисленного процесса [3].

Взаимодействие составляющих процесса ведения ОТД при тушении пожара в РВСЗС $VD(t)$ является транзитивным и задаётся графом (рис. 1).

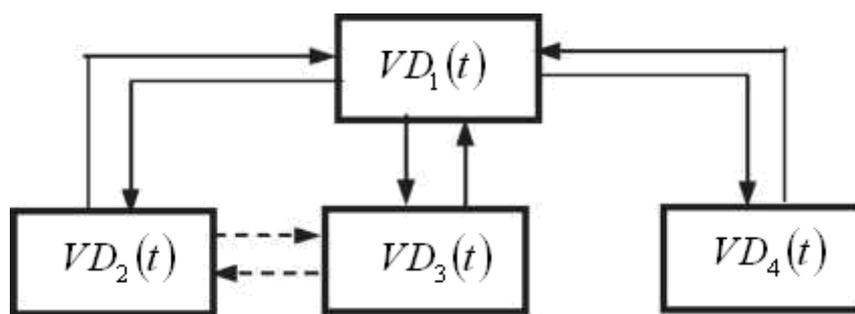


Рис. 1. Граф взаимодействия составляющих процесса ведения ОТД при тушении пожара в резервуаре

При тушении пожара в резервуаре интенсивность ведения ОТД, приходящаяся на единицу зоны пожара, с одной стороны, зависит от числа участков (секторов) тушения, а с другой стороны – от производительности работы личного состава подразделения. Поэтому, в плане пожаротушения, $VD_2(t)$ управляется $VD_1(t)$. Интенсивность работы личного состава отделения на каком-либо

участке (секторе) тушения пожара также зависит как от числа позиций, требующих обслуживания, так и от числа свободных отделений и поэтому (в плане потребности в ведении ОТД при тушении пожара в РВСЗС) $VD_1(t)$ управляет $VD_2(t)$.

Исходя из вышеизложенного, относительно $VD_1(t)$ и $VD_3(t)$ и $VD_1(t)$ и $VD_4(t)$, рассуждения аналогичны. Принимая далее принцип линейного взаимодействия между процессами $VD_i(t)$, рассмотрение проведения операций оперативно-тактического действия процессов $VD_i(t)$ по множествам вариантов тушения пожара в РВСЗС, которые обычно имеют место при практической организации тушения пожара [1], предлагается рассматривать с использованием графов:

- граф состояний процесса проведения операции ОТД при одном из вариантов тушения пожара в резервуарном парке;
- граф состояний при ведении ОТД "обобщённого" отделения пожарной охраны;
- граф состояний единицы нерасходуемого материально-технического ресурса;
- граф состояний единицы расходуемого материально-технического ресурса.

Учитывая вышеизложенное, КСППР для каждого из размеченных графов состояний формирует среднее состояние ОТД по сценариям развития пожара (горение в обваловании, на запорной арматуре, зеркале резервуара, образование кармана, разлив за и в межстенном пространстве резервуара, в кольцевом зазоре, над и под затонувшей крышей, взрыв, горение в группе резервуаров и др.) или тушения пожара в резервуарном парке.

КСППР, интегрируя любым численным методом (его может выбрать старшее должностное лицо на пожаре, начальник штаба пожаротушения или оператор, если в этом есть необходимость, если нет – система по умолчанию выбирает его сама), получает все необходимые состояния элементов системы пожаротушения в РВСЗС, а, следовательно, и характеристики эффективности её работы. Кроме того, по желанию *старшего должностного лица (СДЛ)* на пожаре (руководителя тушения пожара, начальника штаба пожаротушения или оператора) КСППР в ряде случаев может, выполняя соответствующие расчёты, исследовать устойчивость получаемых решений и динамику рассматриваемых процессов пожаротушения.

Реализуя изложенный выше общий метод расчётных состояний для выбора соотношений элементов системы пожаротушения, компьютерная поддержка моделирования функционирования ОТД ПП на пожаре в резервуаре, состоит в том, что с использованием КСППР:

- СДЛ рисует (выбирает из базы знания) графы переходов системы пожаротушения из состояния в состояние и задаёт в соответствии с этими графами матрицы переходов (с учётом всех необходимых констант пожаротушения);

Множество взаимодействующих структур системы пожаротушения мобильными средствами в резервуарном парке:

$$SPMS = \{s, n, SPMS_{ij}^{(m)}\} = \{s, n \{s_i, n_j\}_{rm}\}, \quad (2)$$

где s_i – i -я часть (число) отделений, закрепляемое за n_j -й частью (числом) позиций по тушению. При этом s_i и n_j должны удовлетворять условиям:

$$\sum_{i=1}^N s_i = s, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^R n_j = n, \quad (4)$$

где N – число слагаемых (частей) в (n, r) -м варианте распределения общего числа подразделений s и позиций на тушение n на части (слагаемые);

$$r = 1, 2, \dots, R;$$

$$n = 1, 2, \dots, N;$$

N и R – число всевозможных разбиений чисел s и n на целые части, определяемое средствами комбинаторного анализа и принципами ведения оперативно-тактических действий [4-6];

$SPMS_{ij}^{(m)} = \{s_i, n_j : v d_{ij}\}$ – множество подсистем, составляющих (n, r) вариант структуры системы пожаротушения мобильными средствами в резервуарном парке при заданных значениях s и n .

Эффективность (экономическая) функционирования каждой подсистемы на пожаре определяется формулой:

$$FB_{ij}^{(m)}(SPMS_{ij}^{(m)}) = C_1 s_i + T(h_{ij} C_2) + \theta_{ij}, \quad (5)$$

где C_1 – затраты (расчётные, нормативные) подразделения на поддержание боеготовности (например, за год);

C_2 – затраты (расчётные, нормативные) на ведение операции ОТД при тушении пожара в единицу времени;

T – время ведения ОТД ПП при тушении пожара в резервуаре;

h_{ij} – количество участков тушения пожара в подсистеме ($SPMS_{ij}^{(m)}$) тушения пожаров мобильными средствами;

θ_{ij} – неучтённые затраты.

Эффективность (тактическая) функционирования подсистемы пожаротушения мобильными средствами определяется формулой:

$$PFB_{ij}^{(m)}(SPMS_{ij}^{(m)}) = \frac{n_n^{(m)}}{n_f}, \quad (6)$$

где $n_n^{(m)}$ – нормативное (расчётное) количество позиций на тушение при (r, n) -м варианте распределения;

n_f – фактическое количество позиций.

Рациональное распределение подразделений по позициям на тушение пожара при (r, n) варианте разбиения s и n на части может быть найдено из решения следующей оптимизационной задачи:

$$FB_m = \sum_i \sum_j FB_{ij}^{(m)} VD_{ij} \rightarrow \min \quad (7)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_i FB_{ij} = 1, \quad (8)$$

$$\sum_j FB_{ij} \geq 1, \quad (9)$$

$$\sum_i FB_{ij} s_i \leq \sum_j FB_{ij} n_j, \quad (10)$$

которые означают, что позиции на тушение могут быть закреплены только за одним подразделением, и что любое подразделение должно быть закреплено не менее чем за одной позицией на тушение. Ограничение $\sum_i FB_{ij} s_i \leq \sum_j FB_{ij} n_j$

указывает на то, что при образовании подсистемы пожаротушения $SPMS_{ij}^{(m)}$ отдельные слагаемые разбиения (r, m) могут объединяться, но так, чтобы всегда выполнялось условие, что число подразделений должно быть меньше или равно числу позиций на тушение, определяя тем самым условие осуществления безусловного реагирования на сообщение о пожаре [7].

Тогда с учётом вышеизложенного общая задача оптимизации системы пожаротушения в резервуарном парке мобильными средствами может быть представлена следующим образом:

$$FB(s, n, SPMS_{ij}^{(m)}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N s_i = s, \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^R n_j = n, \quad (13)$$

$$SPMS_{ij}^{(m)} = oSPMS_{ij}^{(m)} \quad (14)$$

где $oSPMS_{ij}^{(m)} = \{os_i, on_j : ovd_{ij}\}_{in}$ – оптимальное решение задачи (7-10).

Решение задачи (11-14) в оптимизации системы пожаротушения в резервуарном парке мобильными средствами возможно при фиксированных средствах подачи огнетушащих средств в следующих вариантах:

- 1) $n = \text{const}$ и задано, найти s и соответствующее значение $SPMS_{ij}^{(m)}$, минимизирующие формулу (11);
- 2) $s = \text{const}$ и задано, найти n и соответствующее значение $SPMS_{ij}^{(m)}$, минимизирующие формулу (11);
- 3) $s = \text{const}$, $n = \text{const}$ и задано, найти $SPMS_{ij}^{(m)}$, то есть решить задачу (7-10).

Работу алгоритма КСППР продемонстрируем на примере организации тушения пожара в РВСЗС. В тушении пожара задействовано 3 пожарных подразделения на основных пожарных автомобилях (m), распределённых на 5 участках тушения (n).

Генерируем все возможные разбиения m и n на части:

$$\begin{array}{l}
 m \\
 h = 1 \quad 3 = 3 \\
 h = 2 \quad 3 = 2 + 1 \\
 h = H = 3 \quad 3 = 1 + 1 + 1 \\
 n \\
 v = 1 \quad 5 = 5 \\
 v = 2 \quad 5 = 4 + 1 \\
 v = 3 \quad 5 = 3 + 2 \\
 v = 4 \quad 5 = 3 + 1 + 1 \\
 v = 5 \quad 5 = 2 + 2 + 1 \\
 v = 6 \quad 5 = 2 + 1 + 1 + 1 \\
 v = V = 7 \quad 5 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1
 \end{array}$$

Формируем матрицу эффективностей $\|FB_{ij}\|$ всех возможных подсистем пожаротушения мобильными средствами. Размерность матрицы – $m \times n$, в нашем случае она имеет вид:

$$\|FB_{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 10 & 12 \\ M & 4 & 6 & 8 & 11 \\ M & M & 7 & 9 & 10 \end{bmatrix},$$

где M – на этом месте не выполняется условие $m \leq n$.

В общем случае элементы матрицы $\|FB_{ij}\|$ рассматриваются в зависимости от того, с каким конкретным объектом имеют дело. Сформировав матрицу эффективностей, формируют матрицу $\|W_m\|$ всех возможных сочетаний разбиений m и n – всех возможных сочетаний r и n . Размерность этой матрицы – $R \times N$. В нашем случае эта матрица имеет вид:

$$\|W_m\| = \begin{bmatrix} \frac{3}{5} & \frac{3}{4+1} & \frac{3}{3+2} & \frac{3}{3+1+1+1} & \frac{3}{2+2+2} & \frac{3}{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1} & \frac{3}{2+1} & \frac{3}{2+1} & \frac{3}{2+1} \\ \frac{5}{2+1} & \frac{4+1}{2+1} & \frac{3+2}{2+1} & \frac{3+1+1+1}{2+1} & \frac{2+2+2}{2+1} & \frac{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1}{2+1} & \frac{2+1}{2+1} & \frac{2+1}{2+1} & \frac{2+1}{2+1} \\ \frac{5}{1+1+1} & \frac{4+1}{1+1+1} & \frac{3+2}{1+1+1} & \frac{3+1+1+1}{1+1+1} & \frac{2+2+2}{1+1+1} & \frac{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1}{1+1+1} & \frac{2+1}{1+1+1} & \frac{2+1}{1+1+1} & \frac{2+1}{1+1+1} \\ \frac{5}{5} & \frac{4+1}{4+1} & \frac{3+2}{3+2} & \frac{3+1+1+1}{3+1+1+1} & \frac{2+2+2}{2+2+2} & \frac{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1}{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1} & \frac{2+1}{2+2+2} & \frac{2+1}{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1} & \frac{2+1}{2+1+1+1+1+1+1+1+1+1+1} \end{bmatrix},$$

где для каждого элемента в числителе указан вариант n разбиения числа m на составляющие, в знаменателе вариант r разбиения числа n . Из матрицы $\|W_m\|$ можно выбрать пару (r, n) , и сформировать все сочетания подсистем пожаротушения в резервуарном парке мобильными средствами, а выбрав наилучшее (минимальное) значение – получить оптимальное решение задачи.

Графическая интерпретация КСППР может высвечиваться на мониторе СДЛ.

На основе анализа матрицы $\|W_{rm}\|$ можно сделать заключение о том, что оптимальным вариантом работы 3 пожарных подразделений на 5 участках тушения, является вариант разбиения подсистемы: $m_1 = 1, n_1 = 2; m_2 = 1, n_2 = 2; m_3 = 1, n_3 = 1$ или $m_1 = 1, n_1 = 3; m_2 = 1, n_2 = 2; m_3 = 1, n_3 = 1$.

С точки зрения математической логики, систему пожаротушения следует разбить на три подсистемы, закрепив одно подразделение за тремя участками тушения, а два других подразделения назначить на свои участки тушения. Или по другому – одно подразделение закрепить за одним участком тушения и за двумя подразделениями закрепить по два участка тушения. Таким образом СДЛ, вводя соответствующие значения, может добиться распределения ресурсов в соответствии со своими предпочтениями. По найденным оптимальным значениям m_i и n_j СДЛ (или иное должностное лицо системы пожаротушения) может найти оптимальные значения материально-технических ресурсов рассматриваемой системы.

Для оценки и согласованности эффективных управленческих решений необходимо использовать оценки с привлечением как можно более строгого математического аппарата. Математический аппарат позволяет СДЛ на пожаре лучше осознать свои предпочтения в контексте конкретного выбора вида ОТД и облегчить взаимопонимание с другими участниками тушения, сконцентрировав их внимание на критических точках, тем самым сократить время выполнения своего распоряжения. В связи с тем, что современный этап развития информационных технологий позволяет генерировать не одно, а несколько допустимых решений, удовлетворяющих заданным ограничениям СДЛ, он как специалист должен оценить и выбрать лучшее. При этом сгенерированное решение должно удовлетворять, как правило, нескольким противоречивым критериям граничных условий.

Идеологию формализации решения задач управления предлагается реализовать **методом индифферентного выбора**.

В тех случаях, когда СДЛ чётко представляет себе, "что на что он готов поменять", может быть использован метод кусочно-линейной аппроксимации [8]. Метод [9] позволяет осуществить линейное, а не групповое упорядочивание, но требует от СДЛ очень много исходной информации, но в тех случаях, когда задачи решаются численными методами и значения "переводных" коэффициентов определены, а неизвестные определяет эксперт или СДЛ через предпочтения путём построения индифферентных поверхностей (рис. 3).

В основе предлагаемого алгоритма (метода) лежит численное исследование пространства возможных оперативно-тактических действий при тушении пожара в РВСЗС. Для выявления структуры предпочтений СДЛ воспользуемся аппаратом замещений [10]. В качестве способа выяснения замещения необходимо использовать выбор альтернатив.

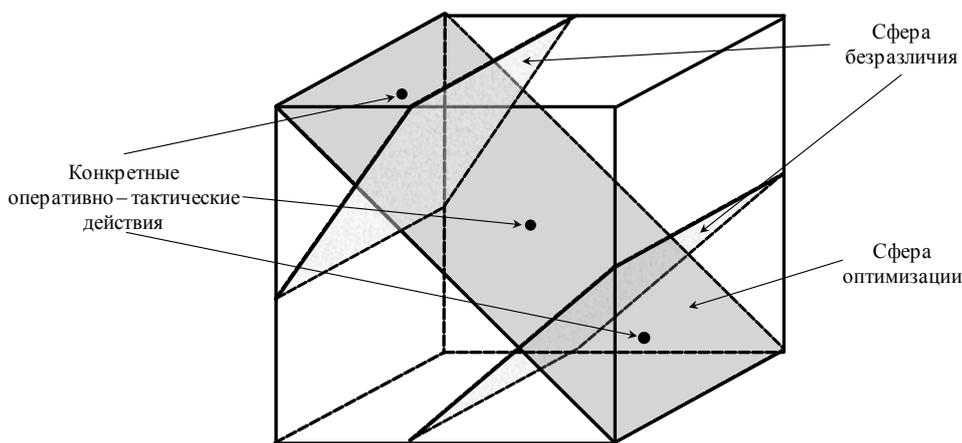


Рис. 3. Куб возможных оперативно-тактических действий при тушении пожара в РВСЗС

Альтернативы – это точки в пространстве возможных оперативно-тактических действий при тушении пожара в резервуаре СДЛ: предлагается альтернатива и некоторое её приращение значения опорного атрибута. СДЛ требуется указать величины изменений для оставшихся атрибутов так, чтобы полученная альтернатива была эквивалентна исходной.

Каждой зоне эквивалентности приписывается свой уровень важности (предпочтения), причем уровень важности (предпочтения) зоны тем выше, чем больше значения функции выбора в точках зоны (рис. 4).

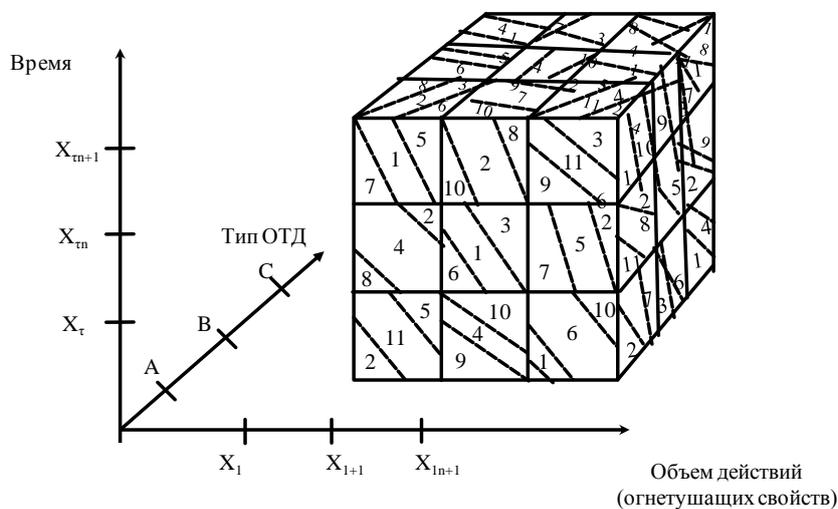


Рис. 4. Куб уровня важности (предпочтения) в критериальной зависимости

Таким образом, проблемная ситуация, характерная для рассматриваемой задачи, заключается в том, что у СДЛ имеется конечный набор из N уровней важности (предпочтения), к одному из которых он может отнести конкретное состояние ведения ОТД при тушении РВСЗС.

Для моделирования работы системы СДЛ необходимо ввести параметры индифферентных линий и разбить процесс или этап тушения на "кубики" (время выполнения ОТД и объём огнетушащих средств и др.).

Каждый "кубик" разделён минимум на три класса, класс определяет приоритет, а его характеристики могут меняться, что должно учитывать СДЛ. Эти характеристики могут быть получены в результате пожарно-тактических занятий (учений) и (или) моделировании и заложены в виде базы знаний в систему. Возможно получение характеристик во время выполнения поставленной задачи на пожаре или получение системой самостоятельно на основе заложенных алгоритмов и тогда его приоритет будет динамически адаптироваться к характеру тушения пожара.

Естественно, число рассматриваемых критериев в КСППР может быть увеличено, но с увеличением их труднее строить индифферентную плоскость предпочтений.

Литература

1. *Данилов М.М., Н.М., Денисов А.Н., Опарин И.Д.* Подход к формированию управленческого решения при пожаротушении в резервуарном парке // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 2 (54). 2014. 5 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
2. *Данилов М.М.* Некоторые аспекты при управлении пожарными подразделениями при ведении оперативно-тактических действий в резервуарных парках хранения нефтепродуктов. Модель общей задачи принятия управленческого решения // Пожаровзрывобезопасность. № 11. 2012. С. 14-17.
3. *Данилов М.М., Н.М., Денисов А.Н.* Теоретическое обоснование метода принятия решений в сложных иерархических системах // Матер. 2-й междунар. науч.-техн. конф. "Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации". М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. С. 156-158.
4. *Липский В.* Комбинаторика для программистов. М.: Мир. 1988. С. 45-64.
5. *Кудрявцев Е.М.* Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. М.: Радио и связь, 1984. С. 143-149.
6. *Приказ* МЧС России от 5 мая 2008 г. № 240 (ред. от 4 апреля 2013 г.) "Об утверждении Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, гарнизонов пожарной охраны для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ".
7. *Федеральный закон* от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ (ред. от 12 марта 2014 г.) "О пожарной безопасности".
8. *Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М.* Многокритериальная оптимизация: математические аспекты. М.: Наука, 1989.
9. *Борзенко В.И., Трахтенгерц Э.А., Шершаков В.М.* Аппроксимационная многокритериальная оптимизация в вычислительных системах // АиТ, 1986, № 9. С. 152-162.
10. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.