

*А.Н. Денисов*

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: dan\_aleks@mail.ru)

## **ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ СТВОЛЬЩИКОМ НА ПОЗИЦИИ ПО ТУШЕНИЮ ПОЖАРА**

*Формализована задача управления ствольщиком при подаче им огнетушащего вещества. Определена функция задачи управления руководителем тушения пожара по подаче струи огнетушащих веществ ствольщиком в очаг пожара.*

*Ключевые слова: глубина тушения, задача, модель, ствольщик, управление.*

*A.N. Denisov*

## **FORMALIZATION OF TASKS CONTROLLING A FIREFIGHTER IN POSITION TO EXTINGUISH THE FIRE**

*The task controlling a firefighter in the supply of a fire-extinguishing substance is formalized. The function of the task of controlling the head of fire extinguishing for supplying the jet of fire extinguishing substances to the fire center is determined.*

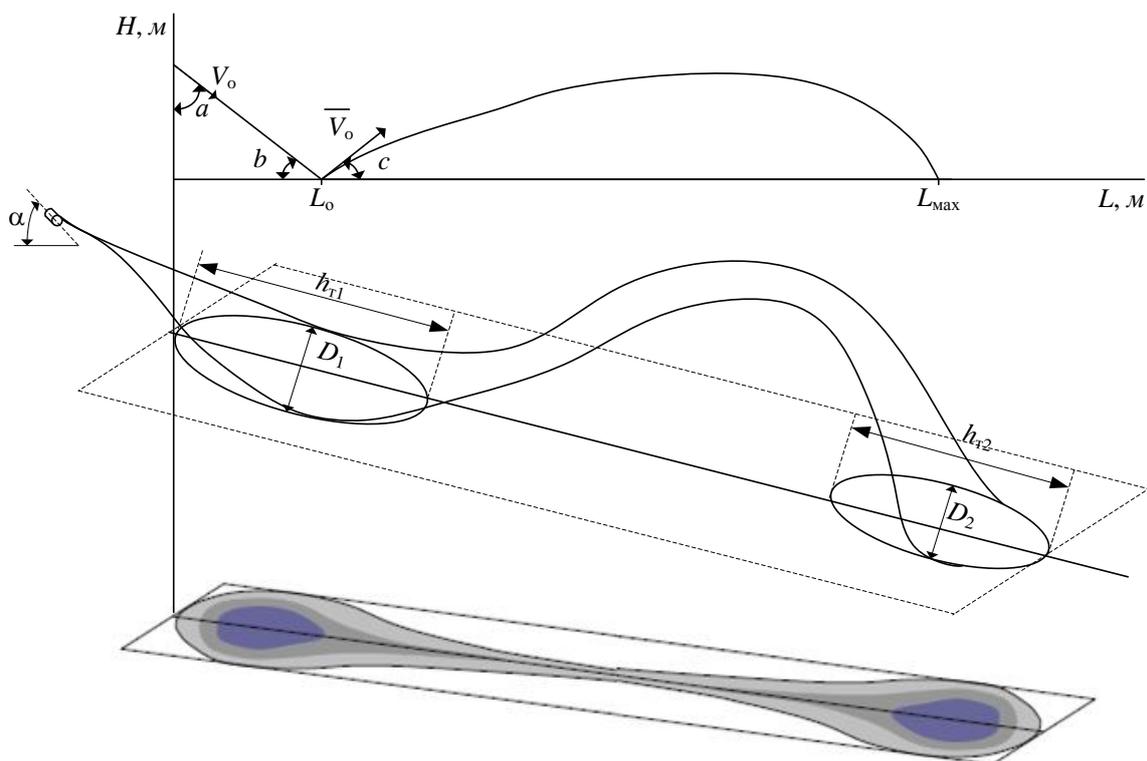
*Key words: the depth of firefighting, a task, model, firefighter, management.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 28 февраля 2017 г.

Как свидетельствует практика оперативного управления при пожаротушении мобильными средствами, от времени реализации задачи управления **руководителем тушения пожара (РТП)** по подаче ствольщиком первого пожарного ствола на решающем направлении зависит результативность тушения пожара. Для его подачи пожарный раньше (до 2005 г.) должен был проникнуть к очагу пожара (подойти как можно ближе к месту горения); направлять струю ОВ (воды или водных растворов поверхностно-активных веществ): в места с наиболее интенсивным горением; навстречу распространению огня; сверху вниз при тушении вертикальных поверхностей ("построчная" траектория); не в дым, а на видимые проявления горения – предметы и объекты.

В настоящее время постановка задачи управления РТП ствольщику на месте пожара заключается в том, что при подаче огнетушащих веществ (ОВ), прежде всего, для локализации пожара требуется прибегнуть к задействованию объектовых стационарных установок и систем тушения пожаров. Применяя ручные пожарные стволы ствольщикам требуется поддерживать подачу ОВ непосредственно в очаг пожара с соблюдением правил техники безопасности и охраны труда.

Реализация задачи управления РТП по подаче огнетушащего вещества в очаг пожара, на охлаждаемую поверхность или в защищаемую зону водяными пожарными стволами может осуществляться ствольщиком прямыми (рис. 1) и навесными (рис. 2) струями.



**Рис. 1.** Схематичная траектория струи огнетушащего вещества из ручного пожарного ствола:

$a$  – угол расположения ручного пожарного ствола, град;  
 $b$  – угол падения струи воды на плоскость, град;

$c$  – угол отражения струи воды от поверхности:  $c = \frac{b}{k}$ , град,

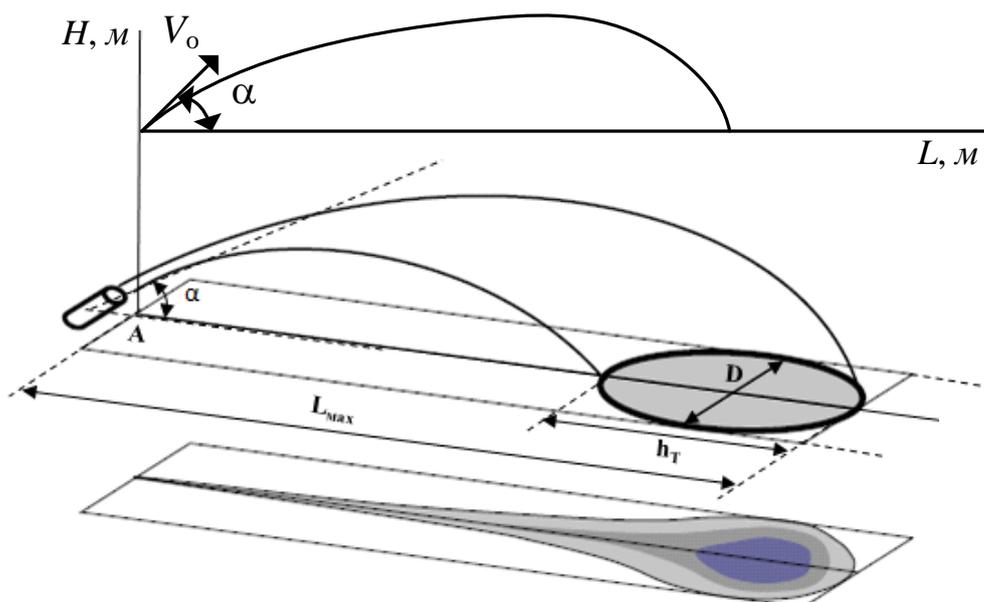
$k$  – коэффициент потери энергии при ударе воды о плоскость:  $k = \frac{V_0}{V_0\text{-bar}}$ ,

$V_0$  – скорость истечения огнетушащего вещества из насадка пожарного ствола,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\bar{V}_0$  – скорость струи огнетушащего вещества после удара о поверхность,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

взаимосвязь углов  $a = 90^\circ - b$

Не зависимо от выше приведённых нормативных коллизий, наличия достаточного количества сил и средств, характера развития пожара и природно-климатических условий оперативно-тактические действия пожарно-спасательных подразделений в период локализации пожара должны быть направлены на выполнение принятых управленческих решений РТП, достижение необходимых и достаточных условий локализации пожара. Реализация которых на пожаре обязанность ствольщика.



**Рис. 2.** Глубина и ширина полосы тушения пожарным стволом (навесная струя):  
*A* – место размещения пожарного ствола;  $\alpha$  – угол наклона пожарного ствола, град;  
 $L_{\text{MAX}}$  – наибольшая дальность струи, м;  $h_T$  – глубина тушения пожарным стволом, м;  
 $D$  – ширина тушения пожарным стволом, м

### Задача управления ствольщиком при подаче им огнетушащего вещества

Функцию задачи управления РТП по подаче струи огнетушащих веществ ствольщиком в очаг пожара представим в следующем виде:

$$POV(x, t) = I_\phi(t) \cdot \phi(x - x_o(t), p(t)), \quad t \geq t_o, \quad x \in X, \quad (1)$$

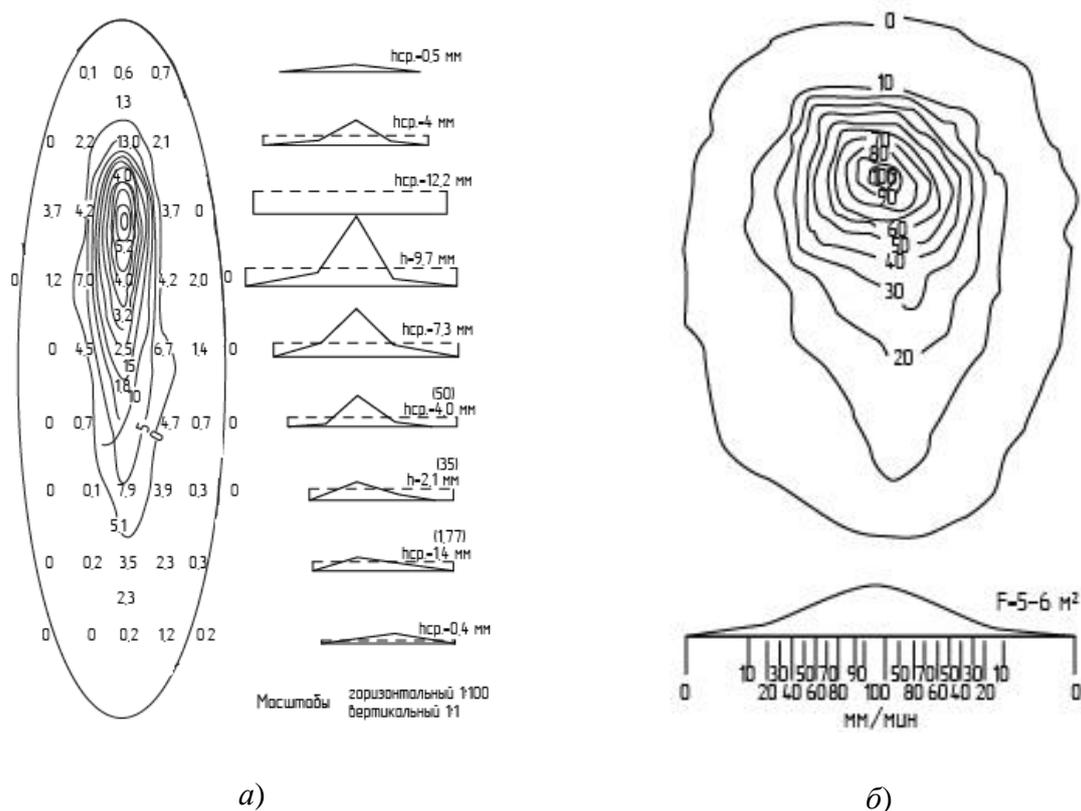
где  $I_\phi$  – фактическая интенсивность подачи огнетушащих веществ;  
 $\phi(x, p)$  – форма пятна орошения струёй огнетушащих веществ (круг, эллипс, составная фигура и др.);

$t$  – время;

$x_o(t)$  – координаты центра пятна орошения струёй огнетушащих веществ;

$p(t)$  – параметр формы пятна орошения струёй огнетушащих веществ, в том числе определяющий степень концентрации огнетушащих веществ.

Координаты центра пятна орошения струёй огнетушащих веществ ( $x_o(t)$ ), соответствуют максимальному значению функции формы пятна орошения струёй огнетушащих веществ ( $\phi(x, t)$ ) (рис. 3 [1]) или вычисляются аналитическим, а так же статистическими методами. Так как функция форма пятна орошения струёй огнетушащих веществ ( $\phi(x, p)$ ) является не отрицательной (в случае её подачи) и нормируемой таким образом, что интеграл от неё равен единице.



**Рис. 3.** Распределение интенсивности, при подаче огнетушащего вещества из пожарного ствола с насадком 25 мм:  
*а* – компактной водяной струей (длина: большой полуоси – 20 м, малой полуоси – 6 м);  
*б* – распылённой водяной струей

Положим, что определён необходимый порядок управления ( $POV_{mp}(x, t)$ , при  $t \geq 0$  и  $x \in X$ ) и тип огнетушащего средства (то есть мы знаем форму пятна орошения струёй огнетушащих веществ ( $\phi(x, t)$ ) и граничные условия подачи этих средств (тушение объектов энергетики, химической промышленности, на больших площадях и т.д.):

$$I_{\phi}(t) \leq I_{mp}(t), \quad A \leq x_o(t) \leq B, \quad C \leq p(t) \leq D, \quad (2)$$

где  $I_{mp}$  – требуемая интенсивность подачи огнетушащих веществ;

$A, B, C, D$  – значения конкретных параметров решения задачи управления непосредственно на пожаре.

Решение задачи управления ствольщиком при подаче им огнетушащего вещества заключается в том, чтобы определить такие значения функций ( $I_{\phi}, x_o(t), p(t)$ ) благодаря которым равенство выполнялось:

$$POV_{mp}(x, t) = POV(x, t), \quad \text{при } t \geq 0 \text{ и } x \in X. \quad (3)$$

В общем случае решение задачи управления ствольщиком при подаче им огнетушащего вещества (3) не существует. В связи с этим рационально определять задачу управления ствольщиком при подаче им огнетушащего вещества как вариационную задачу и для этого найти такие значения функций  $(I_\phi, x_0(t), p(t))$  для некоторого промежутка, что разница между решением требуемой и фактической задачи управления была минимальной:

$$\|POV_{mp}(x) - POV(x)\| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Чем меньше будут значения промежутков, тем будет выше точность решения задачи управления ствольщику по подаче им огнетушащего вещества при тушении пожара.

Зададим траекторию движения пятна орошения струёй огнетушащих веществ ( $Tr$ ) и её интенсивность ( $I$ ). Необходимо определить управление ствольщиком ( $y(t)$ ) при котором вариационная задача (4) достигнет минимума.

Решим задачу для случая "построчной" траектории перемещения пятна орошения струёй огнетушащих веществ. Тогда под траекторией будем подразумевать отрезок  $[a, b]$  непрерывной кусочно-гладкой кривой, частным случаем которого может быть отсутствие движения ( $a = b$ ) и его длину обозначим  $L_{Tr}$ , при этом пятно орошения может перемещаться по всей необходимой для тушения пожара поверхности ( $Tr \subset \Pi$ ).

Зададим траекторию движения в параметрическом виде [2]:  $a_1 = A_1(l)$ ,  $b_1 = B_1(l)$ , при  $l = [a, b]$  и допустив, то что центр пятна орошения струёй огнетушащих веществ совпадает с некоторой точкой ( $z \in [a, b]$ ). Тогда найдём функцию движения центра пятна орошения струёй огнетушащих веществ.

В этом случае параметрические уравнения траектории движения центра пятна орошения струёй огнетушащих веществ и его закон движения в полном объёме определяют местоположение центра пятна орошения струёй огнетушащих веществ на всей плоскости тушения пожара в любой момент реализации задачи управления:  $a_1(t) = A_1(l(t))$ ,  $b_1(t) = B_1(l(t))$ .

Преимуществом данного представления является то, что в место оперирования с двумя параметрами, работаем с одним ( $l(t)$ ).

Определимся с параметрами пятна орошения струёй огнетушащих веществ и рассмотрим возможности ствольщика по подаче ОВ на горящие поверхности – площадь и ширину (фронт).

### **Граничные условия функции задачи по подаче струи огнетушащего вещества ствольщиком в очаг пожара на фиксированную площадь**

В случае подачи ОВ на фиксированную площадь ( $S_{cme}, m^2$ ), габариты которой обусловлены производительностью пожарного ствола и требуемой интенсивностью подачи ОВ на единицу площади [3, 4]:

$$S_{cme} = \frac{q_{cme}}{I_{TP}}, \quad (5)$$

где  $q_{cme}$  – расход ОВ из пожарного ствола, л/с;

$I_{TP}$  – требуемая интенсивность ( $I_s$  – поверхностная) подачи ОС, л/( $m^2 \cdot c$ ):

$$I_{TP} = I_s \cdot h_T. \quad (6)$$

## **Граничные условия функции задачи по подаче струи огнетушащего вещества ствольщиком в очаг пожара на фиксированную ширину (фронт)**

В случае подачи ОВ на фиксированную ширину (фронт) ( $F_{ств}$ , м), величина которой зависит от расхода ОВ из пожарного ствола и требуемой интенсивности подачи ОВ на погонный метр периметра пожара [3, 4]:

$$F_{ств} = \frac{q_{ств}}{I_{л}}, \quad (7)$$

где  $I_{л}$  – интенсивность (линейная) подачи ОС на погонный метр периметра пожара, л/(м·с) [5].

При подаче ОС при тушении пожаров примерно третья часть длины струи используется эффективно, то есть прорабатывает площадь пожара, что составляет для ручных пожарных стволов (А и Б) 5-7 м, для лафетных 10-15 м (из-за невозможности подойти близко к очагу пожара в связи с воздействием лучисто теплоты, потери огнегасительного вещества при соприкосновении с пламенем и горящей поверхностью и т.д.). В расчёте сил и средств на тушение обычно принимают меньшую величину – 5 и 10 м. Такое обоснование количественной характеристики как глубина тушения для пожарных водяных пожарных стволов приводилось при чтении лекций в ВИПТШ МВД СССР [3]. В настоящее время при выполнении пожарно-тактических расчётов для прогнозирования обстановки на месте пожара применяются следующие количественные характеристики глубины тушения: ручные водяные стволы – 5 м; лафетные водяные стволы – 10 метров; гидромониторы и "пушки" – 15 м.

Обоснованность данной характеристики в данный момент влечёт аксиоматический принцип её применения, поэтому на основе анализа публикаций и собственных исследований глубины орошения горящей поверхности (горизонтальной и вертикальной) водяными пожарными стволами, как функции от основных гидравлических характеристик (расхода и напора перед насадком пожарного ствола) [5-9], предлагаются следующие значения (табл. 1).

Так как основное требование первого закона управления при пожаротушении заключается в том, что управляющее воздействие и постановка задач управления при ведении оперативно-тактических действий на пожаре должны быть формализованы в виде комплекса мер, которые максимально оптимальны в аспектах времени и пространства, применяются на местном уровне управления и находятся в строгом отношении к складывающейся ситуации. В комплекс мер входит управленческое воздействие РТП на личный состав заключающееся в организации подачи огнетушащих веществ с определённой интенсивностью и расходом, поэтому предложена формализация задачи управления руководителем тушения пожара по подаче струи огнетушащих веществ ствольщиком в очаг пожара и определены граничные условия для функции задачи управления.

**Зависимость глубины тушения пожарного ствола от типа здания и сооружения**

| <b>Здания и сооружения</b>   | <b>Глубина тушения, м</b> |
|--|---------------------------|
| Административные здания I-III степени огнестойкости, жилые дома и подсобные постройки I-III степени огнестойкости, самолёты и вертолёты, сгораемые покрытия больших площадей в производственных зданиях (при тушении снаружи со стороны покрытия)  | 6-10                      |
| Административные здания (IV степени огнестойкости, подвальные помещения, чердачные помещения), животноводческие здания I-III степени огнестойкости, жилые дома и подсобные постройки IV степени огнестойкости, электростанции и подстанции (трансформаторы, реакторы, масляные выключатели (подача тонкораспыленной воды)), щепы в кучах с влажностью 30-50 %, реактопласты  | 5-10                      |
| Автомобили, трамваи, троллейбусы на открытых стоянках, административные здания V степени огнестойкости, больницы, животноводческие здания IV степени огнестойкости, жилые дома и подсобные постройки (V степени огнестойкости, подвальные помещения, чердачные помещения), культурно-зрелищные учреждения (зрительный зал, подсобные помещения), мельницы и элеваторы, производственные здания (I-III степени огнестойкости, чердачные помещения), сгораемые покрытия больших площадей в производственных зданиях (при тушении снизу внутри здания и при тушении снаружи при развившемся пожаре), самолёты и вертолёты (конструкции с наличием магниевых сплавов корпус), строящиеся здания, холодильники, термопласты   | 4-10                      |
| Древесина балансовая при влажности 40-50 %, культурно-зрелищные учреждения (сцена), производственные здания (IV степени огнестойкости, окрасочные цехи), суда сухогрузные и пассажирские, торговые предприятия и склады товарно-материальных ценностей, трамвайные и троллейбусные депо, гаражи, ангары, мастерские, животноводческие здания V степени огнестойкости, электростанции и подстанции (кабельные туннели и полуэтажи (подача тонкораспыленной воды), машинные залы и котельные отделения), пиломатериалы в штабелях в пределах одной группы при влажности свыше 30 %, льнокостра в отвалах (подача тонкораспылённой воды), полимерные материалы и изделия из них, хлопок и другие волокнистые материалы на открытых складах, ядохимикаты и удобрения | 4-9                       |
| Производственные здания IV-V степени огнестойкости, самолёты и вертолёты (внутренняя отделка (при подаче тонкораспыленной воды), льнотреста (скирды, тюки)   | 4-8                       |
| Производственные здания (подвальные помещения), пиломатериалы в штабелях в пределах одной группы при влажности 8-14 %, каучук (натуральный или искусственный), резина и резинотехнические изделия, круглый лес в штабелях в пределах одной группы, текстолит, карболит, отходы пластмасс, триацетатная плёнка, хлопок и другие волокнистые материалы на закрытых складах   | 3-7                       |
| Ацетон, целлулоид и изделия из него  | 1-6                       |
| Древесина балансовая при влажности менее 40 %, пиломатериалы в штабелях в пределах одной группы при влажности 20-30 %  | 1-5                       |

## Литература

1. Кудряшов А. В. Определение противопожарных расходов воды / Пожарная профилактика: инф. сб. М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1961. С. 132-184.
2. Кубышкин В. А., Финягина В. И. Подвижное управление в системах с распределёнными параметрами. М.: СИНТЕГ, 2005, 232 с.
3. Панарин В. М., Евтюшкин Н. М. Основы теории процесса тушения пожаров: методические указания к изучению курса "Пожарная тактика". М.: УКиУЗ МООП РСФСР, 1964. 77 с.
4. Иванов Е. Н. Противопожарное водоснабжение. М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
5. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.
6. Степанов О. И. Формализация метода поэтапного ввода сил и средств пожарных подразделений при тушении развившихся пожаров в зданиях низкой устойчивости // Технологии техносферной безопасности. Вып. 3 (43). 2012. <http://academygps.ru/ttb>.
7. Глубина тушения пожара как основание для расчёта сил и средств пожарных подразделений / Денисов А. Н., Журавлёв Н. М., Шевцов М. В., Захаревский В. Б. // Технологии техносферной безопасности. Вып. 5 (39). 2011. <http://academygps.ru/ttb>.
8. Денисов А. Н., Гундар С. В. Интенсивность подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. № 7. Т. 23. 2014. С. 80-85.
9. Денисов А. Н., Гундар С. В. Обоснование нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки низового лесного пожара // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (56). 2014. С. 58-65. <http://academygps.ru/ttb>.

## References

1. Kudrjashov A. V. Opredelenie protivopozharnyh rashodov vody (Determination of fire water flow) / Pozharnaja profi-laktika: inf. sb. M.: Ministerstvo kommunal'nogo hozjajstva RSFSR, 1961. Pp. 132-184.
2. Kubyshkin V. A., Finjagina V. I. Podvizhnoe upravlenie v sistemah s raspredel'jonnymi parametrami (Mobile control in distributed parameter systems). M.: SINTEG, 2005, 232 p.
3. Panarin V. M., Evtjushkin N. M. Osnovy teorii processa tushenija pozharov (Fundamentals of the theory of the process of extinguishing fires): metodicheskie ukazanija k izucheniju kursa "Pozharnaja taktika". M.: UKiUZ MOOP RSFSR, 1964. 77 p.
4. Ivanov E. N. Protivopozharnoe vodosnabzhenie (Fire water supply). M.: Strojizdat, 1986. 316 p.
5. Ivannikov V. P., Kljus P. P. Spravochnik rukovoditelja tushenija pozhara (Directory of head of the fire fighting). M.: Strojizdat, 1987. 288 p.
6. Stepanov O. I. Formalizacija metoda pojetapnogo vvoda sil i sredstv pozharnyh podrazdelenij pri tushenii razvivshijsja pozharov v zdanijah nizkoj ustojchivosti (About formalization of a method of stage-by-stage input of forces and means of firefighters divisions at fire extinguishing in buildings of low stability) // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 3 (43). 2012. <http://academygps.ru/ttb>.
7. Glubina tushenija pozhara kak osnovanie dlja raschjota sil i sredstv pozharnyh podrazdelenij (Depth of fire extinguishing as the basis for a resource substantiation of forces and means of fire divisions) / Denisov A. N., Zhuravljov N. M., Shevcov M. V., Zaharevskij V. B. // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 5 (39). 2011. <http://academygps.ru/ttb>.
8. Denisov A. N., Gundar S. V. Intensivnost' podachi vody na tushenie kromki nizovyh lesnyh pozharov (Flow rate of water to extinguish the edge of the ground forest fires) // Pozharovzryvobezopasnost'. No 7. T. 23. 2014. Pp. 80-85.
9. Denisov A. N., Gundar S. V. Obosnovanie normativnoj intensivnosti podachi vody na tushenie kromki nizovogo lesnogo pozhara (Justification of the regulatory intensity of water supply for extinguishing forest fires edge grassroots) // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 4 (56). 2014. Pp. 58-65. <http://academygps.ru/ttb>.