

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

## **АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА В ДВУСТЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ С НЕФТЕПРОДУКТОМ**

*Проведён анализ условий размещения личного состава и пожарной техники на тушение с учётом тепловых излучений. Разработаны алгоритмы выбора средств защиты и расчёта нагрева двустенного резервуара с нефтепродуктом при пожаротушении.*

*Ключевые слова: теплозащита, дежурная смена, пожаротушение, поддержка принятия решений, двустенный резервуар.*

*M.M. Danilov, A.N. Denisov*

## **ALGORITHMIZATION OF CONDUCTING OPERATIONAL AND TACTICAL ACTIONS DURING FIRE FIGHTING DOUBLE WALL TANKS WITH OIL PRODUCTS**

*Analysis of placement condition of personnel and fire equipment to extinguish with regard to thermal radiation. The algorithms of choosing the means of protection and calculating the heat of double wall tanks with oil during fire fighting was designed.*

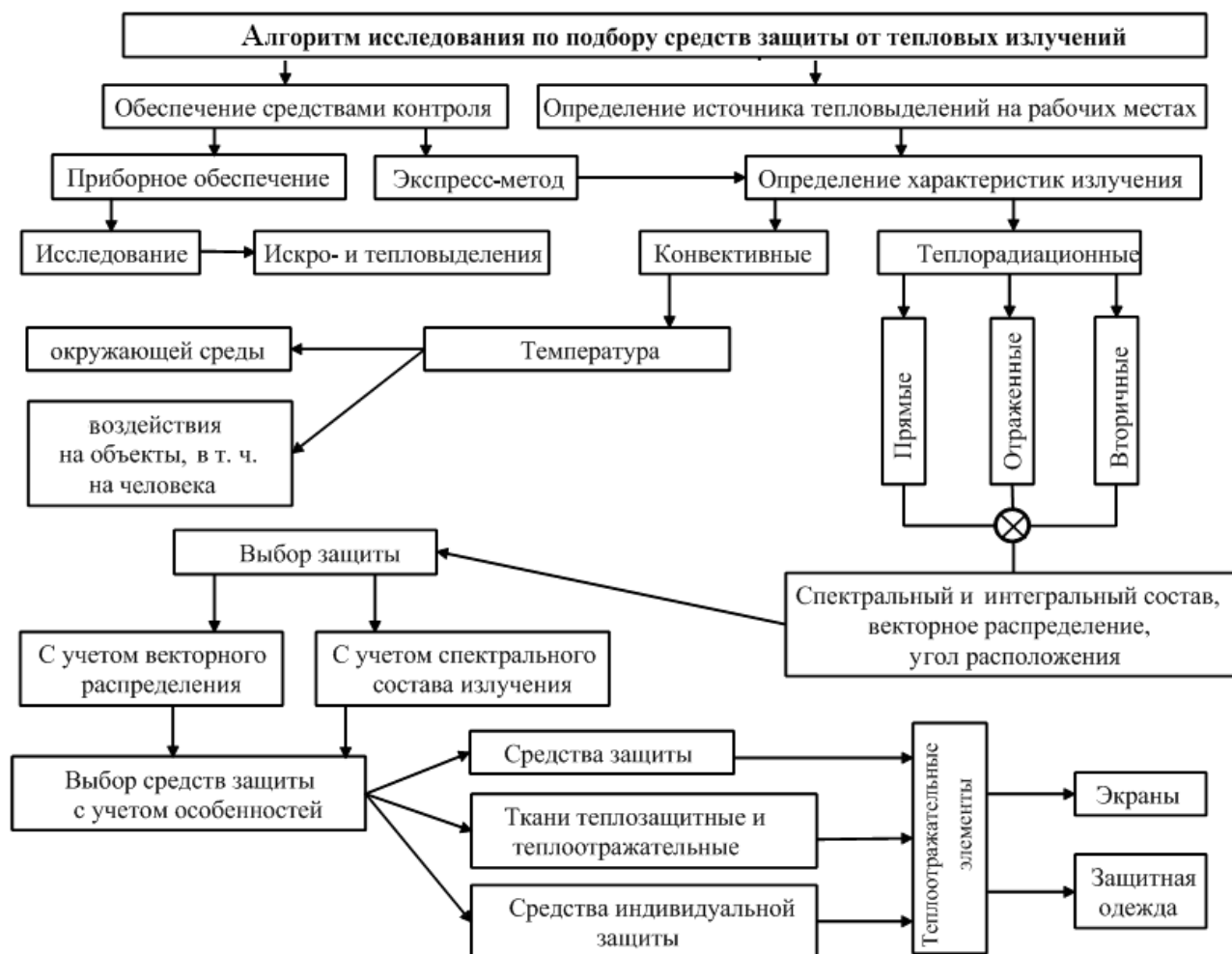
*Key words: thermal protection, duty, fire fighting, decision support, double wall tank.*

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

Несмотря на большое внимание, уделяемое обеспечению пожарной безопасности в резервуарных парках [1, 2], одним из малоизученных вопросов является определение и обоснование параметров расположения подразделений, участвующих в пожаротушении резервуарных парков, имеющих вертикальные стальные резервуары с защитной (двойной стенкой). Необходимо учитывать, что при пожаротушении интенсивные тепловые потоки, воздействующие на личный состав и технику, делают действия по тушению пожара одними из наиболее опасных и тяжёлых [2, 3]. Наряду со средствами индивидуальной защиты пожарных для борьбы с тепловыми потоками применяются пассивные и активные теплозащитные экраны для пожарных автомобилей [4]. Поэтому обеспечение и выбор эффективных средств защиты, а также их необходимого количества, определяются исходя из структуры оперативно-тактических действий.

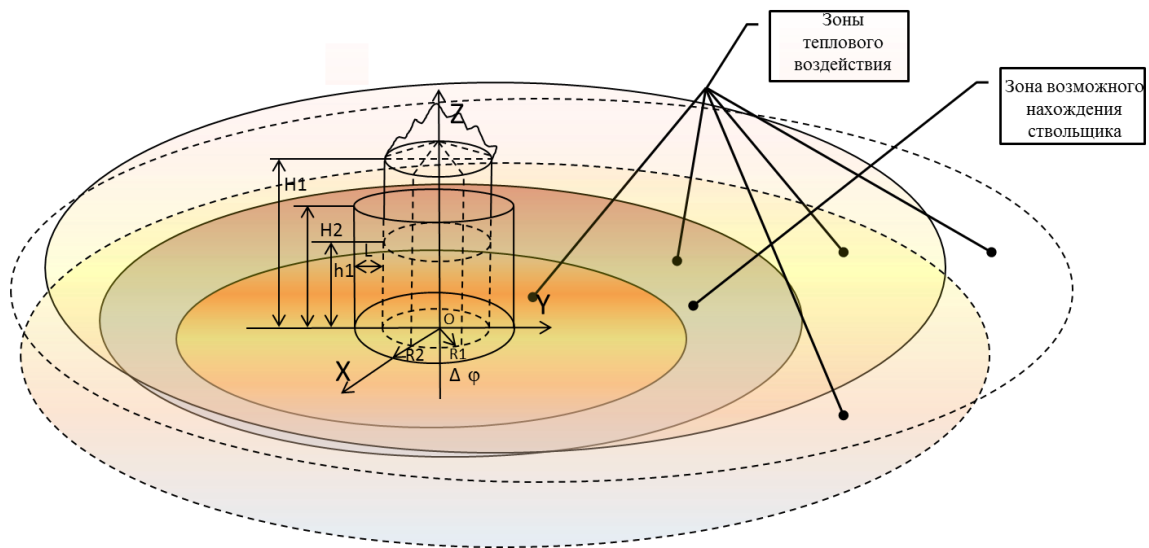
На основе комплексного анализа описаний пожаров и статистической информации [5] выявлено то, что не всегда на пожаре обеспечивается требуемая защита пожарных и пожарной техники от теплового излучения. Поэтому при принятии управленческого решения по размещению пожарной техники на пожаротушение необходимо проводить расчёт нагрева *резервуара вертикального стального с защитной стенкой (РВСЗС)*.

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма выбора средств теплозащиты пожарных, позволяющего провести комплексный анализ наиболее пригодных к использованию средств индивидуальной защиты на позициях по тушению пожара.



**Рис. 1.** Блок-схема алгоритма выбора средств теплозащиты пожарных

Для разработки алгоритма расчёта нагрева двустенного резервуара с нефтепродуктом и воздействием теплового излучения на позиции пожарных подразделений рассчитаем лучистый теплообмен, оценим конвективную теплоотдачу и температуру поверхности нефтепродукта в резервуаре. Для этого выберем начало координат в центре основания негорящего резервуара (рис. 2), при этом обогреваемое ограждение по кольцу резервуара находится на расстоянии от горящего резервуара, нагрев крыши происходит неравномерно (несмотря на хорошую теплопроводность стали) и температура на поверхности резервуара не выравнивается.



**Рис. 2.** Двустенный резервуар под тепловым воздействием пожара:  
 $H1$  – высота основного резервуара;  $H2$  – высота ограждения по кольцу;  
 $R1, R2$  – радиус основного резервуара и двойной стенки соответственно;  
 $L$  – пространство между основной и защитной стенками;  
 $O$  – начало координат (совпадает с центром основного резервуара);  
 $\Delta\phi$  – угол (шаг) разбиения

Построение модели для нагрева резервуара под тепловым воздействием реализовано на основе лучистого теплообмена в работе [7]. Для разработки алгоритма расчёта нагрева учтём неравномерный нагрев резервуара вертикального стального с защитной стенкой. Количество тепла  $dQ_k$ , получаемое областью  $k$  за малый промежуток времени  $dt$ ,

$$dQ_k = dQ_k^u + dQ_k^c + dQ_k^g, \quad k = 1, 2, \dots, N_i + N_{i+1}, \quad (1)$$

где  $dQ_k^u$  – количество тепла излучения;

$dQ_k^c, dQ_k^g$  – количество тепла, получаемое конвекцией от паровоздушной смеси.

Поскольку в нагреве одновременно участвует более одной области необходимо учитывать излучение тепла между ними:

$$dQ_k^u = dQ_k^1 + dQ_k^2 + \sum_{i=1}^{N_i + N_{i+1}} dQ_{ik}, \quad (2)$$

где  $dQ_k^1, dQ_k^2$  – количество тепла, приходящее от горения и излучаемое областью  $k$  соответственно;

$dQ_{ik}$  – количество тепла, приходящее от области  $i, i \neq k$  [8]: учитывая соответственно площадь взаимного облучения между областями.

Аналогично, рассчитывается количество тепла, приходящее от другой области.

Объединяя количество тепла от областей РВСЗС для каждой из областей резервуара, получим общее количество тепла от излучения и рассчитаем лучистый теплообмен по методике, изложенной в [7].

Для оценки конвективной теплоотдачи воспользуемся теорией подобия [8], тогда уравнения теплопередачи может быть представлено в виде соотношения между критериями подобия, среди которых: режим движения – число Рейнольдса; режим свободного движения среды – число Грасгофа; тепловое число Прандтля и безразмерный коэффициент теплоотдачи – число Нуссельта.

Для установившихся наиболее характерных процессов переноса теплоты функциональное уравнение теплообмена в критериальной форме имеет вид:  $Nu = f(Re, Gr, Pr)$ . В частности, для вынужденной конвекции:

$$Nu = f(Re, Pr) = C_1 Pr^{n_1} Re^{m_1}, \quad (3)$$

для свободной конвекции:  $Nu = f(Gr, Pr) = C_2 Pr^{n_2} Gr^{m_2}, \quad (4)$

где  $C_1, C_2, n_1, n_2, m_1, m_2$  – коэффициенты, зависящие от конкретных граничных условий.

Следовательно, коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \lambda_f}{L} \quad (5)$$

Данные по теплообмену в условиях естественной конвекции газов и жидкостей для среднего значения числа Нуссельта [8]:

$$\overline{Nu} = C(Gr Pr)^n, \quad (6)$$

где  $C, n$  – коэффициенты, зависят от диапазона значений  $Gr Pr$ , определяющего характер движения.

Значения коэффициентов в условиях свободной конвекции представлены в [9]. В свою очередь, известна зависимость теплового числа Прандтля для газов.

Оценивая число Нуссельта для паровоздушной смеси в резервуаре, приближённо можно считать, что вдоль ограждения по кольцу, обращённого к факелу, будет происходить турбулентное движение паровоздушной смеси, это согласуется с [10]. Согласно [9], турбулентному режиму соответствуют  $C = 0,135$ ,  $n = 1/3$ . Тогда среднее значение коэффициента конвективной теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \lambda_m}{L} = 0,135 \left( \frac{\Delta T L^3 g Pr}{T_m v^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda_m}{L} = 0,135 \lambda_m \left( \frac{\Delta T g Pr}{T_m v^2} \right)^{1/3}. \quad (7)$$

Поскольку  $\lambda_m$  и  $v$  зависят от средней температуры  $T_m$ , то средний коэффициент теплоотдачи является функцией переменных  $T_m$  и  $\Delta T$ , либо функцией переменных  $T_w$  и  $T_f$ :

$$\lambda_m = \lambda_0 \left( \frac{T_m}{T_0} \right)^n = \lambda_0 \left( \frac{T_w + T_f}{2T_0} \right)^n, \quad (8)$$

где  $T_0 = 273, ^\circ K$ ;  $\lambda_0 = 2,44 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot ^\circ K$ ;  $n = 0,82$ .

Коэффициент конвективного теплообмена растёт с увеличением разности температур между стенкой и газовой средой. Этот результат соответствует данным [1]. Приведённый подход справедлив для теплообмена стенки и крыши резервуара с паровоздушной смесью как внутри резервуара, так и с окружающим воздухом. Поэтому будем считать температуру паровоздушной смеси одинаковой по всему объёму и равной  $T_z(t)$ . По закону Ньютона-Рихмана количество тепла, получаемое областью из газового пространства, есть

$$dQ_k^z = \alpha_z (T_z - T_k) S_k, \quad k = 1, 2, \dots, N_i + N_{i+1}, \quad (9)$$

где  $\alpha_z$  – коэффициент конвективной теплоотдачи во внутреннее газовое пространство РВСЗС.

Кроме того, стенка и крыша участвуют в теплообмене с окружающим воздухом:

$$dQ_k^e = \alpha_e (T_0 - T_k) S_k, \quad k = 1, 2, \dots, N_i. \quad (10)$$

При этом коэффициенты теплоотдачи в паровоздушную смесь  $\alpha_z$  и в окружающий воздух  $\alpha_e$ , соответственно. Объединяя выражения (2), (9), (10) получим общее количество тепла  $dQ_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_i$ , получаемое областью  $k$  за промежуток времени.

Для построения алгоритма будем полагать, что сталь равномерно прогревается по всей толщине. Тогда количество тепла  $dQ_k$  приведёт к изменению температуры на  $dT_k$ :

$$dQ_k = m_k c_c dT_k = S_k \delta \rho_c c_c dT_k,$$

где  $m_k$ ,  $\rho_c$ ,  $\delta$  – масса, плотность и толщина стали соответственно;  
 $c_c$  – теплоёмкость стали.

Для паровоздушной смеси:

$$dQ_z = \alpha_z \sum_{k=1}^{N_i+N_{i+1}} (T_k - T_z) S_k dt. \quad (11)$$

Тепло, полученное паровоздушной смесью, идёт на увеличение температуры  $dT_z$ :

$$dQ_z = m_z c_p dT_z = \rho_z V_z c_p dT_z,$$

где  $m_z$ ,  $\rho_z$ ,  $V_z$  – масса, плотность и объём паровоздушной смеси;  
 $c_p$  – теплоёмкость при постоянном давлении.

Поэтому, (11) преобразуется к виду:

$$\frac{dT_z}{dt} = \frac{\alpha_z}{V_z \rho_z c_p} \sum_{k=1}^{N_i+N_{i+1}} (T_k - T_z) S_k. \quad (12)$$

Тепловой поток от стенок, крыши резервуара и паровоздушной смеси равен:

$$\frac{dQ_k}{dt} = c_0 \varepsilon_n \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_i} H_{ik} \left( \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \alpha_z (T_z - T_k) S_k, \quad (13)$$

$$k = N_1 + 1, \dots, N_i + N_{i+1},$$

где  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_c$  степень черноты нефтепродукта и стенки РВСЗС соответственно.

Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта не будет оказывать существенного влияния на тепловые процессы в толще нефтепродукта [1, 7]. Это позволяет рассматривать нагрев нефтепродукта как нагрев стержня [11].

Полагая, что РВСЗС прогревается равномерно по всей толщине стенки, найдём распределение температур в РВСЗС в произвольный момент времени  $t$ .

Обозначив коэффициент температуропроводности  $a = \lambda_n / c_n \rho_n$ , а плотность теплового потока  $q_k = \frac{1}{S_k} \frac{dQ_k}{dt}$ , предполагая постоянство теплового потока

( $q_k = \text{const}$ ), решение математической модели [11] при замене  $w(x, t) = -\lambda \frac{\partial T_k}{\partial x}$  получит вид:

$$w(x, t) = q_k \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (14)$$

где  $\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-x^2} dx$ .

Согласно [11], если функция  $\mu(t)$  и её производная  $\mu'(t)$  кусочно-непрерывны при  $t > 0$ , то функция  $u(x, t)$  является решением задачи:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad u(x, 0) = 0, \quad u(0, t) = 1, \quad (15)$$

а функция  $w(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mu(\theta) u(x, t - \theta) d\theta$  также является решением той же задачи, но с условием  $u(0, t) = \mu(t)$ . Следовательно, если тепловой поток является функцией времени  $q_k = \mu(t)$ , то

$$w(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mu(\theta) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t - \theta)}} d\theta. \quad (16)$$

Интегрируя последнее равенство получим распределение температур в момент времени  $t$ :

$$\begin{aligned} T_k(x, t) &= T_0 + \frac{1}{\lambda_h} \int_0^t \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^x \mu(\theta) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\theta)}} d\theta dx = \\ &= T_0 + \frac{2\sqrt{a}}{\lambda_h} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \mu(\theta) \sqrt{t-\theta} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\theta)}} d\theta, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\operatorname{ierfc} u = \int_u^\infty \operatorname{erfc} w dw = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc} u$ .

Учитывая  $\theta \rightarrow t$ , дифференцирование по  $t$  приводит к

$$\begin{aligned} T_k(x, t) &= T_0 + \frac{2\sqrt{a}}{\lambda_h} \int_0^t \mu(\theta) \frac{\partial}{\partial t} \left[ \sqrt{t-\theta} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\theta)}} \right] d\theta = \\ &= T_0 + \frac{1}{\lambda_h} \int_0^t \mu(\theta) \left[ \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{t-\theta}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\theta)}} + \frac{x}{2(t-\theta)} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\theta)}} \right] d\theta = \\ &= T_0 + \frac{\sqrt{a}}{\lambda_h \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\mu(t)}{\sqrt{t-\theta}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-\theta)}} d\theta \end{aligned} \quad (18)$$

Если тепловой поток  $\mu(t)$ , представляется кусочно-постоянной функцией:  
 $\mu(t) = \mu_i, \quad t_i < t < t_{i+1}$ , то

$$\begin{aligned} T_k(x, t_i) &= T_0 + \frac{\sqrt{a}}{\lambda_h \sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{i-1} \mu_j \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{1}{\sqrt{t-\theta}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-\theta)}} d\theta = \\ &= T_0 + \frac{1}{\lambda_h} \sum_{j=0}^{i-1} \mu_j \left( \frac{2\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t_i - t_j} e^{-\frac{x^2}{4a(t_i - t_j)}} + x \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a(t_i - t_j)}} \right) \Bigg|_{t_{j+1}}^{t_j}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для расчёта (1) нас будет интересовать температура поверхности нефтепродукта в резервуаре ( $x = 0$ ):

$$T_k(0, t_i) = T_0 + \frac{2\sqrt{a}}{\lambda_h \sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{i-1} \mu_j (\sqrt{t_i - t_j} - \sqrt{t_i - t_{j+1}}) \quad (20)$$

Зададимся допустимой погрешностью  $\Delta$  вычисления суммы из (20), например, так, чтобы погрешность температуры не превосходила:  $\Delta = \frac{\lambda_h \sqrt{\pi}}{2\sqrt{a}}$ .

Делая такую проверку периодически (например, через несколько итераций), будем увеличивать количество отброшенных слагаемых в (20). Такой подход хотя и сохраняет линейную зависимость между временем расчётов и конечным моментом  $t_i$ , но существенно сокращает время.



На основе вышеизложенного алгоритм расчёта нагрева стенки резервуара можно описать следующим образом:

1. В начальный момент времени  $t = 0$  все температуры  $T_k = T_0$ .
2. Если задано распределение температур в момент времени  $t$ , то вычисляем приросты температур  $\Delta T_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_i$ , за время  $\Delta t$  для сухой стенки и крыши резервуара (9), заменяя бесконечно малые приращения конечными.
3. Вычисляем приrost температуры  $\Delta T_c$  паровоздушной смеси за тот же промежуток времени (12).
4. По (13) определяем количество тепла  $\Delta Q_k$ ,  $k = N_i + 1, \dots, N_i + N_{i+1}$ , получаемое поверхностью нефтепродукта за промежуток времени  $\Delta t$ .
5. Определяем температуры стенок и крыши в момент времени  $t + \Delta t$ :
$$T_k(t + \Delta t) = T_k(t) + \Delta T_k, \quad k = 1, 2, \dots, N_i.$$
6. Определяем температуру паровоздушной смеси:
$$T_c(t + \Delta t) = T_c(t) + \Delta T_c.$$
7. По формуле (20) определяем температуру поверхности резервуара.
8. Для определения температур в следующий момент времени переходим к пункту 2.

Алгоритмы выбора средств защиты и расчёта нагрева двустенного резервуара с нефтепродуктом под тепловым воздействием пожара при горении в резервуаре и при пожаре в круговой площадке с ограждением по кольцу могут быть применены в системах поддержки принятия управленческих решений для выработки управленческих решений по размещению на позициях личного состава и техники в резервуарных парках.

Решая задачу выбора при формировании управленческого решения [12], рассмотренные алгоритмы позволят формализовать межуровневые связи при пожаротушении РВСЗС.

#### Литература

1. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Недра, 1984. 151 с.
2. Хыонг Н.М., Денисов А.Н. О расчёте сил и средств пожарных подразделений на начальном этапе тушения пожаров на объектах нефтепереработки // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 4 (32). 2010. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
3. Тараканов Д.В. Функция выбора наилучшего решения при двух критериях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. № 1. С. 24-27.
4. Колетаев А.В. Обеспечение пассивной безопасности пожарных автомобилей // Молодой учёный. 2011. № 3. Т.1. С. 55-62.
5. Приказ МЧС России от 10 декабря 2008 г. № 760 "О формировании электронных баз данных учёта пожаров (загораний) и их последствий". <https://sites.google.com/site/pojstat/home/dokumenty>.
6. Куksинская Т.Е., Либерман В.Б. Влияние прерывности теплового облучения на организм человека // Научные работы Института охраны труда ВЦСПС. Вып. 54. М.: Профиздат, 1968. С. 51-57.
7. Абрамов Ю. А., Басманов А.Е. Нагрев резервуара с нефтепродуктом под тепловым воздействием пожара // Пожаровзрывобезопасность. № 3. 2007. С. 36-42.
8. Дьяконов Г.К. Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 206 с.
9. Бухмиров В.В. Расчёт коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения): методические указания к выполнению практических и лабораторных занятий. Иваново: ИГЭУ, 2007. 39 с.
10. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. Раздел – подготовка и сжигание топлива: Учебн.-метод. комплекс (учеб. пособие). СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 119 с.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 735 с.
12. Данилов М.М. Некоторые аспекты управления пожарными подразделениями при ведении оперативно-тактических действий в резервуарных парках хранения нефтепродуктов. Модель общей задачи принятия управленческого решения // Пожаровзрывобезопасность. № 11. 2012. С. 14-17.