

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ТЕОРИИ ИГР ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

А.В. Микушов;

**В.П. Крейтор, кандидат технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Приведен метод проектной оценки системы обеспечения пожарной безопасности контейнерных терминалов по критерию предотвращенного ущерба от пожара с помощью аппарата теории игр (оценка эффективности в конфликтной среде).

Ключевые слова: эффективность, предотвращенный ущерб, теория игр, контейнерный терминал, пожар

APPLICATION OF STAFF OF THE THEORY OF GAMES FOR EVALUATING EFFECTIVENESS OF FIRE SAFETY OF CONTAINER TERMINALS

A.V. Mikushov; V.P. Kreytor.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

A method for project evaluation of container terminals of fire safety systems on the criterion of avoided damage from the fire with the help of the apparatus of game theory (performance evaluation in a conflict environment).

Keywords: efficiency, prevented damage, game theory, a container terminal, fire

В соответствии с Федеральным законом от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» система обеспечения пожарной безопасности (СОПБ) – это силы и средства, а также меры правового, организационного, экономического и социального характера, направленные на борьбу с пожарами.

Данная система является основной системой любого проектируемого объекта и создается на основе выполнения требований пожарной безопасности, изложенных в нормативных документах [1].

Важным этапом создания такой системы является оценка ее эффективности при выбранном наборе компонентов системы.

Существует множество методик по оценке эффективности СОПБ. К таким методикам справедливо можно отнести методику по оценке пожарного риска. Оценка пожарного риска, из своего определения, проводится в целях определения соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности и определения уровня пожарной опасности объекта защиты [2].

В методике по оценке пожарного риска в качестве количественной меры достижения СОПБ своей цели (критерия эффективности) принимается риск гибели людей при пожарах.

В тоже время, наряду с риском гибели людей, допустимый уровень которого регламентирован Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», на производственных объектах могут выступать риски причинения значительного ущерба, недополучения доходов, неустоек, штрафов и т.п. при возникновении пожара. Нормативно-правовыми актами допустимые

значения последних не регламентируются, однако для таких производственных объектов, как контейнерные терминалы, именно такие риски преобладают в большей степени [3].

Вместе с тем можно отметить еще один недостаток – отсутствие, при проведении расчета, возможности выбора оптимального и целесообразного состава СОПБ.

Ввиду обозначенных противоречий, актуальным является разработка методических аппаратов по оценке эффективности СОПБ производственных объектов, таких как контейнерные терминалы, по экономическим критериям.

Экономические критерии являются универсальными, поскольку применимы для оценки качеств технических систем любого назначения [4]. В качестве такого критерия для системы обеспечения пожарной безопасности контейнерных терминалов наиболее приемлемо принять предотвращенный ущерб от пожара [5–7].

До строительства порта или прибрежных сооружений должно быть рассмотрено не менее двух проектов [1]. Проекты будут являться конкурентоспособными по отношению друг к другу, а сами проектанты – конкурентами (в том числе в одном лице), вследствие чего возникает конфликтная среда. Для разрешений «конфликта» необходима оценка эффективности проекта. Оценка эффективности функционирования в среде, когда результат поведения системы зависит от действия этой среды, может быть найден с помощью аппарата теории игр [4].

$$\mathfrak{E} = \left\| \begin{array}{cccc} \mathfrak{E}_{11} & \dots & \mathfrak{E}_{11} & \dots & \mathfrak{E}_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathfrak{E}_{j1} & \dots & \mathfrak{E}_{11} & \dots & \mathfrak{E}_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathfrak{E}_{n1} & \dots & \mathfrak{E}_{11} & \dots & \mathfrak{E}_{11} \end{array} \right\| . \quad (1)$$

Для математического анализа конфликтной ситуации необходимо построение ее упрощенной модели, называемой игрой, которая может быть задана платежными матрицами [4]. Примером такой платежной матрицы является матрица (1). Ее элементы \mathfrak{E}_{ij} можно интерпретировать как выигрыш первого игрока при выборе i стратегии при условии выбора вторым игроком j стратегии. Игроки в данном случае – проектант(ы), задающие различные конструктивно-технологические решения в проектах.

На основании свойства оптимальных стратегий в теории игр известно, что если игрок I выбирает i стратегию с вероятностью x_i^* (то есть i строку в платежной матрице), а игрок II j стратегию (то есть j столбец в платежной матрице), то всегда соблюдается неравенство [8]:

$$\mathfrak{E}_{1j} \cdot \bar{x}_1 + \dots + \mathfrak{E}_{mj} \cdot \bar{x}_m \geq 1; \quad j=1, \dots, n, \quad (2)$$

где

$$\bar{x}_i > 0; \quad \sum_{i=1}^m \bar{x}_i = \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=1}^m x_i^* = \frac{1}{v} = \bar{v};$$

Первый игрок стремится максимизировать цену игры v (или вполне аналогично минимизировать $1/v$), что позволит сформировать линейную целевую функцию в виде:

$$Z_1 = \min \bar{v} = \min \frac{1}{v} = \min \sum_{i=1}^m \bar{x}_i \quad (3)$$

Игрок II стремится минимизировать математическое ожидание выигрыша игрока I, и его критерием будет:

$$Z_2 = \min \bar{v} = \min \frac{1}{v} = \min \sum_{j=1}^n \bar{y}_j,$$

а система ограничений:

$$x_{11} \cdot \bar{y}_1 + \dots + x_{1n} \cdot \bar{y}_n \leq 1; \quad j=1, \dots, m.$$

Для обоснования и раскрытия сущности практического использования предлагаемого подхода к оценке эффективности СОПБ контейнерного терминала рассмотрены два проекта с различными способами исполнения СОПБ.

В расчете задан сценарий – возникновение пожара на терминале. Граф сценария представлен на рис. 1.

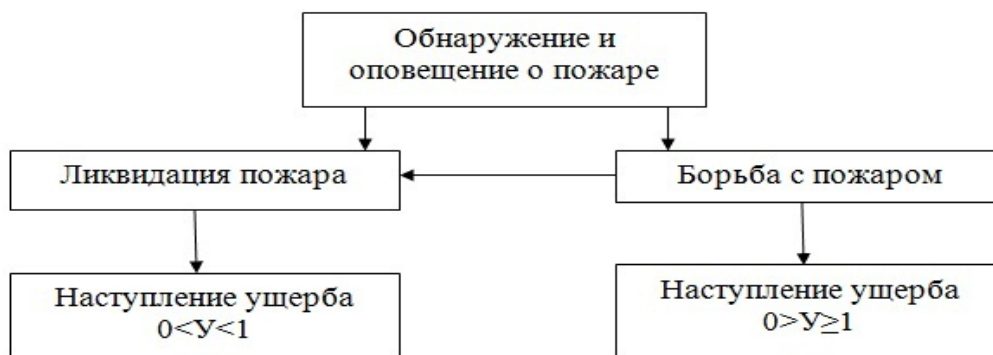


Рис. 1. Графическое представление сценария «Возникновение пожара»

Игра данного вида может быть описана тремя платежными матрицами:

- матрица «Обнаружение и оповещение о пожаре»;
- матрица «Ликвидация пожара»;
- матрица «Борьба с пожаром».

Процесс обнаружения и оповещения о пожаре есть игра за возможность, согласно проекту, к более скорому переходу к процессу тушения пожара, ее цена – вероятность q_{ij}^1 обнаружения пожара и оповещения раньше при использовании в первом проекте i организационно-технологических решений и применения конкурентном проекте j решений.

Для примера, интерпретировано, что проект систем обнаружения и оповещения с использованием автоматических систем считается I типа, без автоматических систем – II типа.

Описанная выше игра представляет собой одноходовую игру. В зависимости от ее исхода возникает ситуация ликвидации пожара или переход к продолжительной борьбе с пожаром. Эти частные игры также определяются платежными матрицами Q_2 и Q_3 , элементами которых являются вероятность наступления ущерба меньшего или большего чем 1. Предлагается не рассчитывать ущерб, этому посвящены работы многих исследователей [5, 7], и, в данном случае, для упрощения, задать его некой величиной «1», это может быть и уничтожение 1 контейнера с грузом, и уничтожение пожаром 1 ряда контейнеров, всего контейнеровоза или всей контейнерной площадки терминала, то, что больше «1» – наихудший исход сценария при выбранных решениях.

Цена игры в предлагаемой модели описывается максимизируемой функцией:

$$Z = \max[\lambda \cdot q_1 \cdot q_2 + (1 - \lambda) \cdot (1 - q_3)], \quad (4)$$

где q_1 – вероятность скорого обнаружения пожара и оповещения; q_2 – вероятность $0 < Y < 1$; q_3 – вероятность $0 > Y \geq 1$; λ – коэффициент, принимающий значения на сегменте $[0,1]$ и определяющий относительную важность выбора средств борьбы с пожаром и возможных внешних условий.

Рассмотрим платежную матрицу обнаружения и оповещения о пожаре со следующими элементами:

$$Q_1 = \begin{vmatrix} 0,7 & 0,3 \\ 0,4 & 0,6 \end{vmatrix}.$$

В матрице в первой строке показано, что при применении в первом проекте системы обнаружения и оповещения I типа пожар с вероятностью 0,7 будет обнаружен раньше, если во втором проекте так же используется I тип, и с вероятностью 0,3, если в конкурентном проекте используется II тип системы. Во второй строке показана ситуация, если в первом проекте выбран II тип системы обнаружения и оповещения.

В первом проекте игрок стремится максимизировать свой выигрыш, а второй игрок – его минимизировать. Для платежной матрицы Q_1 образуется система неравенств:

$$\begin{cases} 0,7 \cdot \bar{x}_1 + 0,3 \cdot \bar{x}_2 \geq 1 \\ 0,4 \cdot \bar{x}_1 + 0,6 \cdot \bar{x}_2 \geq 1 \end{cases}$$

Первый игрок стремится максимизировать цену игры, и в соответствии с формулой (3) его критерий будет выглядеть как:

$$\min Z_1 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2.$$

Для игрока II соответствующая задача линейного программирования будет иметь вид:

$$\begin{cases} 0,7 \cdot \bar{y}_1 + 0,4 \cdot \bar{y}_2 \leq 1 \\ 0,3 \cdot \bar{y}_1 + 0,6 \cdot \bar{y}_2 \leq 1 \end{cases},$$

а критерий для игрока II:

$$\min Z_2 = \bar{y}_1 + \bar{y}_2.$$

Вектор оптимальной стратегии, который может обеспечить минимальное значение функции (3) при ограничениях (2), находится по результатам решения задачи линейного программирования, например с помощью симплекс-метода [8]:

$$\bar{x} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{m+n}).$$

Данный вектор используется для определения векторов x^* и y^* игроков I и II в исходной $(m \times n)$ -игре.

Для игрока I вектор оптимальной стратегии определяется по формуле:

$$x^* = \frac{1}{\bar{v}} \cdot \bar{x} = \left(\frac{1}{\bar{v}} \cdot \bar{x}_1, \dots, \frac{1}{\bar{v}} \cdot \bar{x}_m \right),$$

где $\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1}{\bar{x}_1 + \dots + \bar{x}_m}$.

Стратегия для игрока II находится по выражению:

$$y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*),$$

где $y_j^* = \frac{1}{v} \cdot \bar{x}_{m+j}$.

Цена игры определяется как величина, обратная критерию задачи линейного программирования.

Отложим по оси абсцисс сегмент единичной длины (рис. 2) [4, 8]. Левый конец сегмента будет изображать первую стратегию первого игрока, а правый конец – его вторую стратегию. Все промежуточные точки сегмента будут представлять собой смешанные стратегии. Вероятность q_2 стратегии I представляется отрезком $0L_A$, а вероятность q_1 стратегии II – отрезком L_A1 . Проведем через концы сегмента $[0,1]$ два перпендикуляра к оси абсцисс. На левом перпендикуляре будем откладывать выигрыш при использовании стратегии I, а на правом – при использовании стратегии II. Соединим точки выигрыша первого игрока, соответствующие применению вторым игроком одной из своих чистых стратегий.

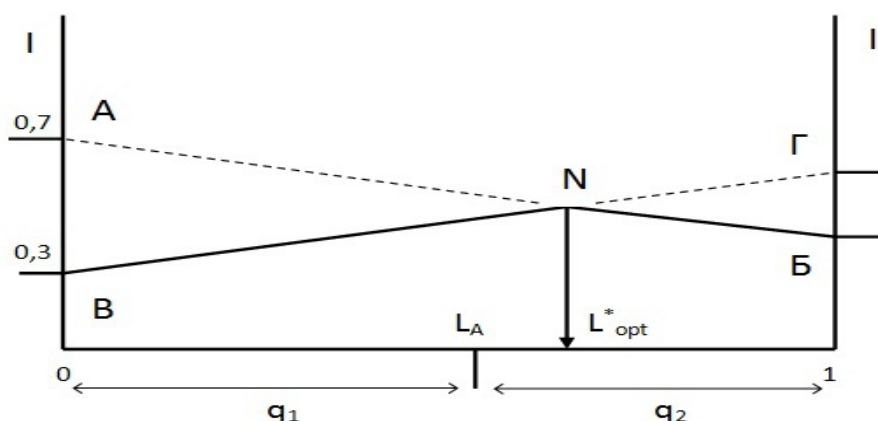


Рис. 2. Графическая интерпретация игры при выборе одним из игроков не более двух чистых стратегий

Если в игре «Обнаружение и оповещение о пожаре» конкурент в своем проекте выберет систему обнаружения и оповещения о пожаре I типа, то выигрыш первого проекта составит при выборе такой же системы 0,7, а при выборе II типа – 0,4. Очевидно, что при любой смешанной стратегии выигрыш будет выражаться точкой на прямой AB. Прямая БГ при этом покажет выигрыш в первом проекте при выборе конкурентом системы II типа.

Первый игрок должен найти такую оптимальную стратегию L^*_{opt} , при которой его минимальный выигрыш (при наихудшем для него поведении вторым игроком) обращался бы в максимум. Для этого строится нижняя граница выигрыша ВNB. Точка N, являющаяся максимумом, определяет решение и цену игры.

В игре «Обнаружение и оповещение о пожаре» точка, определяющая решение и цену игры, определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} N = -0,3 \cdot q_2 + 0,7 \\ N = 0,3 \cdot q_2 + 0,3 \end{cases} \rightarrow N = 0,5; q_2 = 0,6667.$$

Это значит, что в первом проекте в систему обеспечения пожарной безопасности должны входить оба типа системы обнаружения и оповещения о пожаре. Частота выбора той или иной системы составит: система I типа – 33 % случаев, а II типа – 67 % случаев. При этом вероятность ликвидации пожара до перехода в стадию длительной борьбы с пожаром на контейнерном терминале составит 50 %.

Вероятность наступления благоприятного исхода в случае возникновения пожара, а именно наступление ущерба $0 < Y < 1$ при проектировании системы обеспечения пожарной безопасности контейнерного терминала, может быть рассчитана по формуле [4]:

$$q_{ij}^2 = 1 - \left(1 - \frac{\bar{p}_{ij}}{\omega_i}\right)^{n_i}, \quad (5)$$

где \bar{p}_{ij} – вероятность ликвидации пожара до выхода его из контейнера при выборе первым проектантом i типа средств борьбы с пожаром при условии, что второй проектант (конкурент) для расчета выберет неизвестные j условия развития аварийной ситуации; ω_i – количественная мера, показывающая выбранную характеристику i типа средств борьбы с пожаром, необходимую для благоприятного исхода сценария; n_i – фактические значения выбранной характеристики i типа средств борьбы с пожаром.

Далее, аналогично системам оповещения, задаются два варианта исполнения средств борьбы с пожаром. В первом варианте в проекте предусмотрено наличие в порту пожарного судна одного типа и пожарного депо, во втором – пожарное депо не требуется, ввиду расположения порта в радиусе выезда ближайшей пожарной части, а также пожарное судно другого типа. В качестве количественной меры ω_i и n_i выбрано количество пожарных стволов (табл. 1).

Следующий этап проведения расчета заключается в задании условий, протекающих при пожаре. Заданы два возможных условия [9]:

$$\text{I} - \begin{cases} q_s > q_\phi \\ \tau_{\text{крит}} > \tau_{\text{туш}} \end{cases};$$

$$\text{II} - \begin{cases} q_s > q_\phi \\ \tau_{\text{крит}} < \tau_{\text{туш}} \end{cases},$$

где q_s – плотность зажигающих тепловых потоков; q_ϕ – действующая (фактическая) плотность тепловых потоков; $\tau_{\text{крит}}$ – критические моменты времени, например, потеря прочности конструкций контейнера; $\tau_{\text{туш}}$ – время тушения пожара.

Таблица 1. Характеристики средств борьбы с пожаром

Тип средств борьбы с пожаром	ω_i	n_i	\bar{p}_{ij}		q_{ij}^2	
			$j=1$	$j=2$	$j=1$	$j=2$
I	4	14	0,6	0,3	0,89	0,66
II	10	22	0,1	0,1	0,19	0,19

Выделенная часть табл. 1 является платежной матрицей игры «Ликвидация пожара». Ее графическая интерпретация показана на рис. 3. Она означает, что целесообразным является выбор средств борьбы с пожаром при проектировании СОПБ по первому из представленных вариантов, при этом цена игры, то есть вероятность наступления ущерба $0 < Y < 1$, будет не менее чем 0,66.

Выигрышная стратегия первого проектанта является чистой.

Платежная матрица «Борьба с пожаром» составляется с использованием формулы (5), но здесь конкуренты меняются местами. Цель первого проектанта не максимизировать, а минимизировать вероятность q_{ij}^2 . Характеристики условных средств борьбы с пожаром, выбранных в конкурентном проекте, могут быть представлены в виде табл. 2, а графическая интерпретация игры показана на рис. 4.

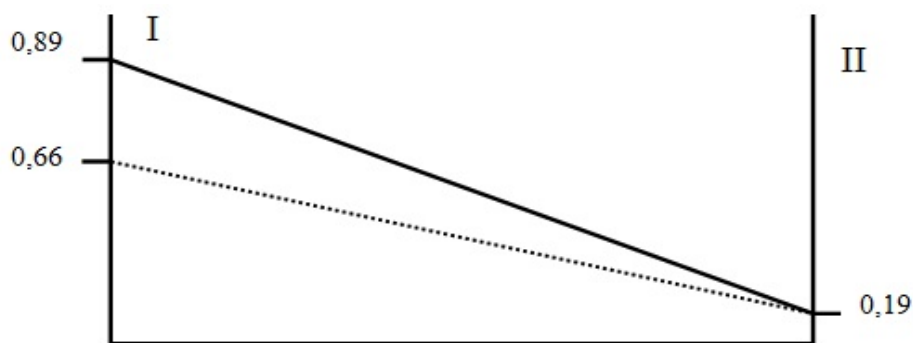


Рис. 3. Графическая интерпретация игры «Ликвидация пожара»

Таблица 2. Характеристики средств борьбы с пожаром во втором проекте

Средства борьбы с пожаром в конкурентном проекте		$j=1$	$j=2$
ω_j		7	4
n_j		10	19
Условие I $\begin{cases} q_s > q_\phi \\ \tau_{\text{крит}} > \tau_{\text{туш}} \end{cases}$	\bar{p}_{ij}	0,7	0,3
	q_{ij}^2	0,65	0,77
Условие II $\begin{cases} q_s > q_\phi \\ \tau_{\text{крит}} < \tau_{\text{туш}} \end{cases}$	\bar{p}_{ij}	0,4	0,5
	q_{ij}^2	0,44	0,39

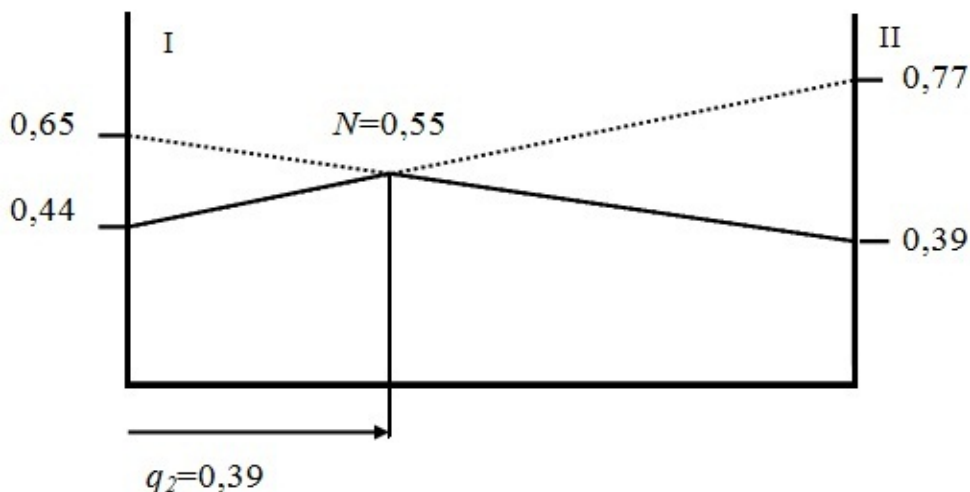


Рис. 4. Графическая интерпретация игры «Борьба с пожаром»

Анализ игры «Борьба с пожаром» показывает, что для выбора проектных решений, направленных на оптимизацию проектируемой системы обеспечения пожарной безопасности контейнерных терминалов, необходимо задавать условия развития пожара в следующем соотношении: в 51 % случаев – условие I и 39 % случаев – условие II. Вероятность наступления ущерба $0 > Y \geq 1$ при выборе предложенных проектных решений в рассмотренном примере составит 0,55.

Общая цена всей игры «Возникновения пожара» (4) при $\lambda=0,5$, то есть равнозначности задач, составит 0,421 при оптимально выбранной СОПБ контейнерного терминала.

Изложенные общие принципы построения модели оценки эффективности в конфликтной среде являются концепцией для дальнейшего развития системы выбора проектных решений системы обеспечения пожарной безопасности контейнерных терминалов. Благодаря предложенной методике, можно оптимально подобрать мероприятия по совершенствованию средств противопожарной защиты судов-контейнеровозов, контейнерных терминалов, средств борьбы с пожарами, планирования боевых действий пожарных подразделений при пожаре, по оценке фактических пределов огнестойкости конструкций контейнеров, проведения пожарно-технических экспертиз и других целей.

Литература

1. РД 31.3.05-97. Нормы технологического проектирования морских портов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030782> (дата обращения: 11.04.2016).
2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из справ.-правового портала «КонсультантПлюс».
3. Микушов А.В., Орлов Г.В. Особенности противопожарной защиты контейнерных терминалов морских портов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2011. 362 с.
4. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещения кораблей и судов. Т. 2: Анализ и синтез системы «Корабль». СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
5. Структура проектной модели обеспечения безопасности морских инженерных сооружений и прибрежных сооружений / В.Ю. Дорофеев [и др.] // Вопросы оборонной техники. 2012. Сер. 16. Вып. 11–12. С. 61–64.
6. Рабардель П. Люди и технологии. Когнитивный подход к анализу современных инструментов. М.: Ин-т психологии РАН, 1999.
7. Любимов Е.В. Проектное обеспечение пожарной безопасности судов // Судостроение. 2007. № 4. С. 20–24.
8. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. Основы методов оптимизации. М.: МАИ, 1998.
9. Микушов А.В., Любимов Е.В., Орлов Г.В. Моделирование изменения площади пожара в морском контейнере // Роль местной противовоздушной обороны и пожарной охраны в годы Великой отечественной войны: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Кокшетау, 2015. 169 с.

References

1. RD 31.3.05-97. Normy texnologicheskogo proektirovaniya morskix portov [Norms of technological design of seaports]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030782> (date of the address: 11.04.2016). (In Russ).
2. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyx velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyx obektax: Prikaz MCHS Rossii ot 10 iyulya 2009 g. № 404. [About the statement of a technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects: The order of Emercom of Russia from 7 July 2009 year No. 404. Access from a legal-reference portal «ConsultantPlus»]. (In Russ).
3. Mikushov A.V., Orlov G.V. Osobennosti protivopozharnoj zashhity kontejnernyx terminalov morskix portov: materialy IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Features of fire-prevention protection of container terminals of seaports. Materials IV of the international scientific and practical conference]. St. Petersburg: St. Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, 2011. 362 p. (In Russ).
4. Gajkovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshheniya korablej i sudov. [Theory of design of displacement of the ships and courts]. Volume 2: Analysis and synthesis of the Ship system. St. Petersburg: NIC. MORINTEH, 2014.
5. Struktura proektirovochnoj modeli obespecheniya bezopasnosti morskix inzhenernyx sooruzhenij i pribrezhnyx sooruzhenij / V.Yu. Dorofeev [i dr.] [Structure of design model of safety

of sea engineering constructions and coastal constructions] // Questions of defensive equipment. 2012. Series 16. Issue 11–12. Pp 61–64.

6. Rabardel P. Lyudi i texnologii. Kognitivnyj podxod k analizu sovremennyx instrumentov [People and technologies. Cognitive approach to the analysis of modern tools]. Moscow: Institute of psychology of the Russian Academy of Sciences, 1999.

7. Lyubimov E.V. Proektnoe obespechenie pozharnoj bezopasnosti sudov [Design ensuring fire safety of courts] // Shipbuilding. 2007. No. 4. Pp 20–24.

8. Lesin V.V., Lisovec Yu.P. Osnovy metodov optimizacii [Bases of methods of optimization]. Moscow: MAI, 1998.

9. Mikushov A.V., Lyubimov E.V., Orlov G.V. Modelirovanie izmeneniya ploshhadi pozhara v morskome kontejnere [Modeling of change of the fire area in the sea container] // Role of Local Antiaircraft Defense and Fire Protection in days of the Great Patriotic War: collection of materials of the International scientific and practical conference. Kokshetau, 2015. 169 p.