

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.03.6-13>

УДК 614.849

Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации

© Н. В. Каменецкая¹, О. М. Медведева¹, С. Б. Хитов^{2✉}, М. В. Сильников¹

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

² Западный военный округ Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 191055, г. Санкт-Петербург, Дворцовая пл., 10)

РЕЗЮМЕ

Введение. Создание резервов материальных ресурсов для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера является одной из основных задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Достаточный объем материальных ресурсов, их рациональное размещение, правильное хранение и качественное обслуживание обеспечивают возможность оперативного устранения непосредственной опасности для жизни и здоровья людей, организации первоочередного жизнеобеспечения населения в зоне бедствия.

Цели и задачи. Возникает актуальная проблема предварительной оценки, учета и обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники пожарно-спасательных подразделений в ходе ликвидации ЧС, исходя из принципа необходимой достаточности и максимально возможного использования имеющихся сил и средств.

Методы. Для планирования необходимого количества запасных частей специальной техники с учетом их стоимости, а также для обоснования решения об оптимальном числе ремонтных бригад, способных обеспечить своевременную замену вышедших из строя агрегатов в условиях ЧС или при ликвидации ее последствий, применимы методы теории очередей и систем массового обслуживания.

Результаты и их обсуждение. В статье предложена методика расчета оптимального резерва запасных частей для обеспечения нормальной работы специальной техники с экономическим обоснованием, учитывающим материальные затраты на их приобретение и на содержание ремонтных бригад. Приведены расчеты, которые позволяют на практике предварительно учитывать риски, связанные с недостаточным резервом запасных частей и с вынужденными простоями специальной техники из-за отсутствия возможности быстро устранить неисправности в ходе ликвидации ЧС и проведения аварийно-спасательных работ. Выработаны практические рекомендации по определению экономически целесообразного количества запасных частей и числа операторов, производящих ремонт специальной техники, с учетом материальных затрат и показателей надежности.

Заключение. Проблематика статьи отвечает современным направлениям научного обеспечения оперативной деятельности МЧС России и обусловлена наличием широкого круга задач, связанных с вопросами создания, хранения, использования и восполнения резервов материальных ресурсов в ходе ликвидации ЧС природного и техногенного характера.

Ключевые слова: оценка надежности; материальные ресурсы; простои специальной техники; оптимальное число ремонтных бригад; теория очередей; системы массового обслуживания;

Для цитирования: Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Сильников М. В. Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 6–13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13.

✉ Хитов Сергей Борисович, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response

© Nataliya V. Kamenetskaya¹, Olga M. Medvedeva¹, Sergey B. Khitov^{2✉}, Mikhail V. Silnikov¹

¹ Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

² Western Military District of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Dvortsovaya Square, 10, Saint Petersburg, 191055, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The creation of material resources reserves for the elimination of consequences of natural disasters and technogenic accidents (emergency situations — ES) is one of the main tasks of United State system of prevention and response to emergency situations. A sufficient amount of material resources, their rational placement, proper storage and quality service ensures the ability quickly to liquidate the immediate danger to human life and health, the organization of paramount life support for the population in the disaster area.

Aims and purposes. There is an actual problem of preliminary assessment, accounting and justification of the spare parts reserve for work special technical means (STM) of the firefighting and rescue service in the course of emergency response, based on the principle of the necessary sufficiency and the maximum possible use of the available forces and means.

Methods. For the planning the required amount of spare parts for STM, taking into account their cost, as well as for substantiating the decision on the optimal number of repair teams capable of ensuring timely replacement of failed units in an ES or its consequences, the methods of queuing theory and queuing systems are applicable.

Results and discussion. The article proposes a method of calculating the optimal reserve of spare parts to ensure the normal operation of STM with economic justification, taking into account the material costs of their acquisition and maintenance of repair teams. There are presented the calculations that allow in practice to take into account the risks associated with insufficient reserve of spare parts and forced downtime of STM due to the inability to quickly troubleshoot during ES response and rescue operations. Practical recommendations for determination of economically expedient quantity of spare parts and number of the operators making repair of special equipment taking into account material costs and indicators of reliability are developed.

Conclusions. The problems of the article correspond to the modern directions of scientific support of operational activities of Emercom of Russia and due to the presence of a wide range of tasks related to the creation, storage, use and replenishment of reserves of material resources during the liquidation of consequences of natural disasters and technogenic accidents.

Keywords: reliability assessment; material resources; downtime of special technical means; optimal number of repair teams; queuing theory; queuing systems.

For citation: N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov, M. V. Silnikov. Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 6–13 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13.

✉ *Sergey Borisovich Khitov*, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Введение

Создание резервов материальных ресурсов для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера является одной из основных задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Деятельность этой системы направлена на повышение эффективности действий пожарно-спасательных подразделений в зонах стихийных бедствий или техногенных аварий, на формирование комплекса мероприятий по снижению рисков возникновения ЧС и уменьшению тяжести их последствий [1].

Достаточный объем материальных ресурсов, их рациональное размещение, правильное хранение и качественное обслуживание обеспечивают возможность оперативного устранения непосредственной опасности для жизни и здоровья людей, организации первоочередного жизнеобеспечения населения в зоне бедствия.

Нельзя не учитывать, что в крайне сложной обстановке чрезвычайной ситуации и в ходе устранения ее последствий с применением различных видов специальной техники (СТ) существенно возрастает вероятность отказов в ее работе из-за выхода из строя отдельных функциональных частей. Это обусловлено повышенной нагрузкой на эту технику при

проведении аварийно-спасательных работ (АСР), необходимостью ее транспортировки в зону бедствия, неблагоприятными условиями эксплуатации.

Цели и задачи исследования

В связи с вышесказанным возникает актуальная проблема обоснования резерва запасных частей, требуемого для обеспечения бесперебойной работы специальной техники пожарно-спасательных подразделений (далее — ПСП) в ходе ликвидации ЧС, исходя из принципа необходимой достаточности и максимально возможного использования имеющихся сил и средств [2].

Недостаток запасных частей вызывает вынужденные простои СТ, в то же время чрезмерное количество запасных частей нерационально с финансовой точки зрения. Обоснование оптимального запаса жизненно важных деталей машин требует серьезного экономического подхода. При решении сформулированной задачи нужно учитывать статистику выхода из строя СТ в процессе ее эксплуатации, уровень подготовки обслуживающего технического персонала, возможности по восстановлению вышедших из строя деталей, узлов, блоков, а также экономические показатели, учитывающие материальные затраты на содержание СТ.

Резерв запасных частей для специальной техники ПСП должен быть таким, чтобы она работала эффективно и без простоев, и финансирование ее обслуживания было экономически обосновано [3].

Поставленная задача является оптимизационной, а значит, решаемой с помощью известных математических методов (методов исследования операций). Применение математического моделирования для прогнозирования различных вариантов развития событий в сложных условиях ликвидации последствий ЧС позволяет обеспечить высокую эффективность формирования оптимальных управленческих решений, что подтверждается многолетним отечественным и зарубежным опытом [4–19].

Для планирования необходимого количества запасных частей специальной техники с учетом их стоимости, а также для обоснования решения по оптимальному числу ремонтных бригад, способных обеспечить своевременную замену вышедших из строя агрегатов в условиях ЧС или при ликвидации ее последствий, применимы методы теории массового обслуживания [9, 10, 18, 19].

В частности, нормальное функционирование специальной техники ПСП МЧС России, обеспеченное наличием необходимого запаса технических средств и достаточного количества обслуживающего персонала (бригад механиков), в определенных условиях можно рассматривать как систему массового обслуживания (СМО).

Рассмотрим СМО, в которой допускается обслуживание с резервом, т. е. с запасными частями, группы однотипных машин (специальной техники). Назовем функциональные части машин, которые могут выходить из строя во время работы, агрегатами, а способ их ремонта и восстановления в работе — агрегатным.

Постановка задачи

Пусть имеется m однотипных машин (СТ). В процессе работы агрегаты, приводящие их в движение, могут выходить из строя случайным образом с постоянной плотностью λ . Время выхода из строя распределено по показательному закону со средним значением t_n . Для замены пришедших в негодность агрегатов имеется n запасных. Как только агрегат отказывает, во избежание простоев техники его сразу заменяют исправным запасным, если таковой имеется. Неисправный агрегат поступает в пункт ремонта, который обслуживают c операторов. Время восстановления каждого агрегата определяется характером неисправности, опытом оператора и другими факторами и может рассматриваться как случайная величина. Время ремонта неисправных агрегатов распределено по показательному закону со средним значением $t_{\text{обс}}$ и параметром μ (где μ — интенсивность потока обслуживания заявок).

Введем ограничения. Будем считать входящий поток объектов в исследуемой СМО простейшим [20], т. е. обладающим следующим свойством: результатом сложения большого числа ординарных стационарных потоков с различными последствиями является поток объектов, сколь угодно близкий к простейшему [21].

В указанных условиях необходимо определить основные характеристики СМО с учетом выхода из строя агрегатов и их восстановления с использованием имеющихся в наличии исправных запасных частей. По результатам расчетов следует выработать рекомендации по улучшению этих характеристик для повышения эффективности и надежности работы системы в целом, т. е. принять меры, направленные на устранение или корректировку возможных рисков, обусловленных недостаточным количеством запасных частей [1–6].

Методы исследования

Для решения сформулированной задачи воспользуемся рядом известных формул [22, 23].

В рассматриваемых условиях возможны следующие состояния СМО с отказами:

S_0 — все запасные агрегаты исправны и все машины работают;

S_k — k запасных агрегатов ($1 \leq k \leq n$) неисправны и либо ремонтируются все, либо часть ремонтируется, а часть ожидает ремонта;

S_{n+s} — n запасных агрегатов неисправны и s машин не работают ($1 \leq s \leq m$).

Обозначим вероятности этих состояний в момент времени t соответственно через $p_0(t)$, $p_k(t)$, $p_{n+s}(t)$. Получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t); \\ p'_k(t) = -(\lambda + k\mu) p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) + (k+1)\mu p_{k+1}(t) \text{ при } 0 < k \leq c; \\ p'_k(t) = -(\lambda + c\mu) p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) + c\mu p_{k+1}(t) \text{ при } c < k < n+1; \\ p'_{n+s}(t) = -(\lambda + c\mu) p_{n+s}(t) + \lambda p_{n+s-1}(t) + c\mu p_{n+s+1}(t) \text{ при } 1 \leq s \leq m; \\ p'_{n+m}(t) = -c\mu p_{n+m}(t) + \lambda p_{n+m-1}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $p_{n+m}(t)$ — вероятность отказа в обслуживании, когда специальная техника простаивает из-за отсутствия запасных частей. Эта вероятность в данной постановке задачи является риском, который необходимо минимизировать [1–6].

Введем обозначение $\lambda/\mu = \alpha$. Тогда с учетом нормирующего условия

$$\sum_{k=0}^{n+m} p_k(t) = 1$$

получим для стационарного режима следующие решения:

- 1) вероятность того, что все агрегаты исправны и все машины работают:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^c \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=1}^{n-c+1} \left(\frac{\alpha}{c} \right)^k + \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{n-c} \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=2}^m (\alpha)^k \right]^{-1}; \quad (2)$$

- 2) вероятность того, что вышли из строя k агрегатов (или s машин, $1 \leq s \leq m$):

$$P_k = \frac{\alpha^k}{k!} P_0 \quad \text{при } k \leq c; \quad (3)$$

$$P_k = \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{k-c} \frac{\alpha^c}{c!} P_0 \quad (4)$$

при $c < k < n+1$, $n+1 \leq k \leq m+n$;

- 3) среднее число неисправных машин, ожидающих ремонта:

$$N_0 = \sum_{k=1}^m k P_{k+n}; \quad (5)$$

- 4) коэффициент простоя машин:

$$K_0 = N_0 / m; \quad (6)$$

- 5) среднее число неисправных агрегатов:

$$N_p = \sum_{k=1}^{n+m} k P_k. \quad (7)$$

Рассмотренная математическая модель решаемой задачи является замкнутой СМО с очередью длиной N_0 (средним числом неисправных машин, ожидающих ремонта). Характеристики такой СМО можно улучшать, меняя значения параметров n , c , $t_{\text{обс}}$, добиваясь как можно меньшего значения $P_{\text{отк}} = P_{n+m}$.

Пример оценки надежности работы группы однотипных машин (специальной техники) с возможностью применения запасных частей

Для повышения надежности работы группы пожарно-спасательной техники в зоне ликвидации ЧС, состоящей из четырех однотипных машин ($m = 4$), имеются в наличии две запасные части ($n = 2$). Это могут быть двигатели, колеса или другие важные детали СТ. Во время проведения АСР эти функциональные части машин (агрегаты) могут выходить из строя и находиться некоторое время в ремонте. Чтобы по этой причине не возникали простои техники, вышедшие из строя агрегаты мгновенно заменяются исправными запасными частями, если они есть. В противном случае специальная техника бездействует. Предположим, что среднее время наработки агрегата на один отказ в сложных условиях ЧС

$\bar{t}_n = 100$ ч. Ремонт производится одной бригадой ($c = 1$). Среднее время восстановления одного агрегата $t_{\text{обс}} = 10$ ч.

От того, сколько времени в среднем специальная техника будет простаивать, зависят показатели надежности и эффективности ее работы.

Положим, что показатель надежности ΔH (%) пропорционален числу работающих машин и выражается зависимостью

$$\Delta H = \frac{m - N_0}{m} \cdot 100,$$

где N_0 — среднее число машин, простаивающих из-за отсутствия исправных запасных агрегатов;

m — общее число машин.

Оценим показатели надежности и эффективности работы группы машин (специальной техники) в рамках приведенного примера, используя формулы (1)–(7).

Средняя плотность потока неисправностей $\lambda = 4 \cdot \frac{1}{100} = 0,04$. Тогда $\alpha = 0,04 \cdot 10 = 0,4$.

По формуле (2) определим P_0 :

$$P_0 = [1 + 0,4 + 0,4 (0,4 + 0,16) + 0,4 \cdot 0,4 (0,16 + 0,064 + 0,0256)]^{-1} \approx 0,601.$$

По формуле (3) вычислим P_1 , по формуле (4) — P_2 :

$$P_1 = 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,2404;$$

$$P_2 = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0962.$$

Величину N_0 рассчитаем по формуле (5), предварительно определив вероятности P_3, P_4, P_5 и P_6 по формуле (4):

$$P_3 = (0,4)^2 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0385;$$

$$P_4 = (0,4)^3 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0154;$$

$$P_5 = (0,4)^4 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0061;$$

$$P_6 = (0,4)^5 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0024.$$

Проверим выполнение нормирующего условия работы СМО в стационарном режиме:

$$\sum_{k=0}^{n+m} P_k(t) = 1;$$

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 0,601 + 0,2404 + 0,0962 + 0,0385 + 0,0154 + 0,0061 + 0,0024 = 1.$$

Условие выполнено, следовательно, расчеты верны.

Найдем по формуле (5) среднее число машин, простаивающих из-за выхода из строя агрегатов:

$$N_0 = 1P_3 + 2P_4 + 3P_5 + 4P_6 \approx 0,097.$$

Тогда надежность работы группы машин (СТ)

$$\Delta H = (4 - 0,097)/4 \cdot 100\% = 97,6\%.$$

Если бы агрегаты не выходили из строя, то надежность работы составила бы 100 %. Следовательно, 2,4 % потеряно из-за того, что агрегаты работают не вполне надежно.

Рассчитаем, насколько повысилась бы надежность СТ, если бы она работала без запасных агрегатов, но каждую машину обслуживала бы своя ремонтная бригада. В этом случае по условиям задачи на каждую единицу СТ поступает поток неисправностей с плотностью $\lambda_0 = 1/100 = 0,01$. Время восстановления $t_{\text{обс}} = 10$ ч.

В этих условиях математическая модель задачи будет являться одноканальной СМО с отказами. Тогда вероятность выхода каждой единицы СТ из строя из-за неисправности агрегата можно определить по формуле Эрланга, где

$$\alpha_0 = \lambda_0 \overline{t_{\text{обс}}} = 0,01 \cdot 10 = 0,1.$$

Тогда

$$P_{\text{отк}} = 0,1/(1 + 0,1) \approx 0,091.$$

Отсюда среднее число машин, простаивающих из-за выхода из строя агрегатов, составит:

$$N_0 = 4P_{\text{отк}} = 0,364.$$

Тогда

$$\Delta H = \frac{4 - 0,364}{4} \cdot 100 \% \approx 91 \%.$$

Таким образом, надежность в этом случае будет на 6,6 % ниже, чем в случае с двумя запасными агрегатами. Кроме того, потребуется в 4 раза больше ремонтных бригад. Учитывая стоимость запасных частей, затраты на содержание ремонтных бригад, доход от повышения надежности, можно определить, какой из этих способов целесообразен с экономической точки зрения.

Результаты и их обсуждение

Произведенные в рамках рассмотренного примера расчеты показывают, что надежность функционирования специальной техники не вполне удовлетворительна. Для снижения риска и повышения эффективности работы группы однотипных машин (СТ) необходимо увеличить число запасных частей, чтобы надежность работы СТ приблизилась к 99,9 %, что соответствует нормативному значению вероятности отказа $P_n = 0,001$. Для повышения надежности можно также увеличить количество ремонтных бригад. Среди различных вариантов решения задачи следует выбрать оптимальный по стоимости.

Для определения экономически целесообразного количества запасных частей и числа операторов, производящих ремонт СТ, предлагается воспользоваться формулой, которая среди всех вариантов позволила бы выбрать тот, который бы обеспечивал минимум потерь при эксплуатации специальной техники [22]:

$$\min C_0 = nC_{\text{зап}} + (cC_{\text{оп}} + C_{\text{пр}}P_{\text{отк}})T_a,$$

где $C_{\text{зап}}$ — стоимость запасных частей;

$C_{\text{оп}}$ — стоимость содержания одного оператора в единицу времени;

$C_{\text{пр}}$ — стоимость единицы времени простоя СТ;

T_a — среднее время амортизации запасного блока (части).

Располагая экономическими показателями (стоимость запасных частей, затраты на содержание ремонтных бригад, показатели надежности), можно определить, какой из планов целесообразен с экономической точки зрения.

Заключение

Методы математического моделирования находят широкое применение для выработки оптимальных управленческих решений в оперативной деятельности МЧС России при планировании мероприятий по защите населения и территорий от ЧС.

В настоящей статье с применением математического аппарата теории очередей и систем массового обслуживания рассмотрен вариант решения актуальной задачи обоснования резерва запасных частей для специальной техники пожарно-спасательных подразделений, необходимого для проведения аварийно-спасательных работ в зоне ликвидации ЧС.

Сформулируем ряд задач оперативной деятельности МЧС России, решение которых можно осуществить с применением представленной методики: обоснование структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России [9]; оценка эффективности функционирования поста радиационно-химического и биологического наблюдения в зоне ЧС [10]; расчет показателей эффективности функционирования производственно-технического центра МЧС России; моделирование мероприятий технической эксплуатации средств электронно-вычислительной и оргтехники в системе МЧС России [18]; оценка риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по созданию, хранению, использованию и восполнению резервов материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. — М. : МЧС России, 2018. — 65 с.

2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Федер. закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 23.06.2016). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (дата обращения: 05.02.2019).
3. *Batkovskiy A. M., Fomina A. V., Semenova E. G., Trofimets V. Ya., Trofimets E. N.* Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions // *Journal of Applied Economic Sciences*. — 2016. — Vol. XI, Issue 5(43). — P. 828–841.
4. *Кривошонов В. В., Малыгин И. Г., Сай В. В.* Система обеспечения безопасности от рисков при производстве пожарной техники // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2008. — № 4(8). — С. 61–68.
5. *Balychev S. Yu., Batkovskiy A. M., Kravshuk P. V., Trofimets V. Ya., Trofimets E. N.* Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects // *Espacios*. — 2018. — Vol. 39, No. 10. — P. 27.
6. *Черных А. К., Вилков В. Б.* Управление безопасностью транспортных перевозок при организации материального обеспечения сил и средств МЧС России в условиях чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 52–59. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.52-59.
7. Guidelines for chemical transportation safety, security, and risk management. — New York – New Jersey : Center for Chemical Process Safety, John Wiley & Sons, Inc., 2008. — 202 p. DOI: 10.1002/9780470924860.
8. Terrorism and international transport: towards risk-based security policy. — Paris : OECD Publishing, 2009. — 150 p. DOI: 10.1787/9789282102329-en.
9. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Математическое моделирование при решении задач обоснования структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2016. — № 1. — С. 62–67.
10. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Применение методов математического моделирования при решении задачи выявления и оценки радиационной, химической и биологической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2016. — № 2(38). — С. 64–69.
11. *Akbar N. S., Beg O. A.* (eds). Modeling and simulation in engineering sciences. — New York : iTeXLi, 2016. — 289 p. DOI: 10.5772/62109.
12. *Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O.* (eds). Modeling, simulation and optimization for science and technology. — Amsterdam : Springer, 2014. — 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
13. *Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R.* Mathematical models, methods and applications. — New York : Springer, 2015. — 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
14. *Giordano F. R., Fox W. P., Horton S. B.* A first course in mathematical modeling. — 5th ed. — Boston : Cengage Learning, 2013. — 704 p.
15. *Habib M.* (ed.). Empirical modeling and its applications. — New York : ExLi4EvA, 2016. — 146 p. DOI: 10.5772/61406.
16. *Meerschaert M. M.* Mathematical modeling. — 4th ed. — New York : Academic Press, 2013. — 368 p.
17. *Yang Xin-She* (ed.). Mathematical modeling with multidisciplinary applications. — New York : John Wiley & Sons, 2013. — 592 p. DOI: 10.1002/9781118462706.
18. *Каменецкая Н. В., Корольков А. П., Хитов С. Б.* Математическое моделирование мероприятий технической эксплуатации средств электронно-вычислительной и оргтехники в системе МЧС России // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2017. — № 4(44). — С. 89–94.
19. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Маслаков М. Д.* Методика оценки риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 2-3. — С. 5–13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13.
20. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Анализ входящего потока объектов при математическом моделировании систем массового обслуживания // *Приоритетные научные направления: от теории к практике : материалы XXXVIII Международной научно-практической конференции*. — Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2017. — С. 156–162.
21. *Лукин А. И.* Системы массового обслуживания: анализ систем массового обслуживания с отказами в военной практике. — М. : Воениздат, 1980. — 189 с.
22. *Новиков О. А., Петухов С. И.* Прикладные вопросы теории массового обслуживания. — М. : Советское радио, 1969. — 400 с.
23. *Вагнер Г.* Основы исследования операций / Пер. с англ. — М. : Мир, 1973. — Т. 3. — 504 с.

REFERENCES

1. *Methodical recommendations on creation, storage, use and replenishment of reserves of material resources for liquidation of emergency situations of natural and technogenic character*. Moscow, Emercom of Russia Publ., 2018. 65 p. (in Russian).
2. *On protection of population and territories from natural and man-made emergencies*. Federal law of Russia on 21 December 1994 No. 68-FZ (ed. on 23 June 2016) (in Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (Accessed 5 February 2019).
3. A. M. Batkovskiy, A. V. Fomina, E. G. Semenova, V. Ya. Trofimets, E. N. Trofimets. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions. *Journal of Applied Economic Sciences*, 2016, vol. XI, issue 5(43), pp. 828–841.
4. V. V. Krivoshonok, I. G. Malygin, V. V. Say. Safety system in fire equipment manufacturing. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2008, no. 4(8), pp. 61–69 (in Russian).
5. S. Yu. Balychev, A. M. Batkovskiy, P. V. Kravshuk, V. Ya. Trofimets, E. N. Trofimets. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects. *Espacios*, 2018, vol. 39, no. 10, p. 27.
6. A. K. Chernykh, V. B. Vilkov. Management of transportation safety at the organization of material maintenance of forces and means Emercom of Russia in Emergencies. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 52–59 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.52-59.
7. *Guidelines for chemical transportation safety, security, and risk management*. New York – New Jersey, Center for Chemical Process Safety, John Wiley & Sons, Inc., 2008. 202 p. DOI: 10.1002/9780470924860.
8. *Terrorism and international transport: towards risk-based security policy*. Paris, OECD Publishing, 2009. 150 p. DOI: 10.1787/9789282102329-en.
9. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. Mathematical modeling in problem of solving situation of explanation of the structure and functioning of the field hospital of Emercom of Russia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2016, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).
10. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. Application of methods of mathematical modelling at the solution of the problem of identification and the assessment of radiation, chemical and biological situation in zone of emergency. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 2(38), pp. 64–69 (in Russian).
11. N. S. Akbar, O. A. Beg (eds). *Modeling and simulation in engineering sciences*. New York, iTeXLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109.
12. W. Fitzgibbon, Yu. A. Kuznetsov, P. Neittaanmäki, O. Pironneau (eds). *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Amsterdam, Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
13. A. H. Siddiqi, P. Manchanda, R. Bhardwaj. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
14. F. R. Giordano, W. P. Fox, S. B. Horton. *A first course in mathematical modeling*. 5th ed. Boston, Cengage Learning, 2013. 704 p.
15. M. Habib. (ed.). *Empirical modeling and its applications*. New York, ExLi4EvA, 2016. 146 p. DOI: 10.5772/61406.
16. M. M. Meerschaert. *Mathematical modeling*. 4th ed. New York, Academic Press, 2013. 368 p.
17. Yang Xin-She (ed.). *Mathematical modeling with multidisciplinary applications*. New York, John Wiley & Sons, 2013. 592 p. DOI: 10.1002/9781118462706.
18. N. V. Kamenetskaya, A. P. Korolkov, S. B. Khitov. Mathematical modeling of technical exploitation's activities of electronic computers and office equipment in the system of Emercom of Russia. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2017, no. 4(44), pp. 89–94 (in Russian).
19. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov, M. D. Maslakov. Methodology of estimation of the failures's risks in the work of special technical means in emergency situations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 2-3, pp. 5–13 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13.
20. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. The objects incoming flow analysis in the queuing systems mathematical modeling. In: *Prioritetnyye nauchnyye napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority scientific areas: from theory to practice]. Proceeding of XXXVIII International Scientific-Practical Conference. Novosibirsk, Publishing House of the Central News Service, 2017, pp. 156–162 (in Russian).

21. A. I. Lukin. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya: analiz sistem massovogo obsluzhivaniya s otkazami v voyennoy praktike* [Queuing systems: Analysis of queuing systems with rejections in military practice]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980. 189 p (in Russian).
22. O. A. Novikov, S. I. Petukhov. *Prikladnyye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Applied questions of queuing theory]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1969. 400 p (in Russian).
23. H. M. Wagner. *Principles of operations research*. New Jersey, Prentice-Hall, 1969 (Russ. ed.: H. M. Wagner. *Osnovy issledovaniya operatsiy*. Moscow, Mir Publ., 1972, vol. 3. 504 p.).

Поступила 10.02.2019; после доработки 26.03.2019; принята к публикации 30.03.2019
Received 10 February 2019; received in revised form 26 March 2019; accepted 30 March 2019

Информация об авторах

КАМЕНЕЦКАЯ Наталия Владимировна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-8575-4877, Researcher ID: P-7170-2019, e-mail: natkam53@mail.ru

МЕДВЕДЕВА Ольга Марленовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7644-8691, Researcher ID: P-8572-2019, e-mail: mom65@mail.ru

ХИТОВ Сергей Борисович, Западный военный округ Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7565-9780, Researcher ID: P-1280-2019; e-mail: khitoff_s@mail.ru

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры переподготовки и повышения квалификации специалистов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7960-0863, Researcher ID: Y-9143-2018, e-mail: director@npo-sm.ru

Information about the authors

Nataliya V. KAMENETSKAYA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8575-4877, Researcher ID: P-7170-2019, e-mail: natkam53@mail.ru

Olga M. MEDVEDEVA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7644-8691, Researcher ID: P-8572-2019, e-mail: mom65@mail.ru

Sergey B. KHITOV, Western Military District of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7565-9780, Researcher ID: P-1280-2019, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Mikhail V. SILNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Retraining and Advanced Training of Specialists, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7960-0863, Researcher ID: Y-9143-2018, e-mail: director@npo-sm.ru