Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017, Т.3, №4
ISSN 2413–9858

УДК 519.217.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

А.М. Мишин, Е.Ф. Лосев, С.В. Хорозов

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING OF THE SAFE CONDITION OF THE OBJECTS OF INCREASED DANGER

A.M. Mishin, E.F. Losev, S.V. Khorozov

Аннотация. В статье рассматривается задача по комплексной оценке текущего состояния рисков на объектах повышенной опасности и других промышленных объектах, катастрофы на которых влекут за собой риски для жизни людей или значительные экономические риски. Для ее решения рассмотрен подход, основанный на вероятностном состоянии безопасности объекта, реализованный с помощью марковских цепей и уравнений Колмогорова. Решение найдено с использованием модифицированной системы уравнений Колмогорова, реализованной в виде математической модели, учитывающей большое количество факторов, влияющих на безопасность объекта. Её целесообразно использовать для проведения глубокого и уточненного расчета. Такой подход позволяет производить оценку фактического риска объекта в целом и значительно снизить время реакции администрации на восстановление безопасности объекта.

Ключевые слова: *комплексная оценка безопасности; снижение рисков; объект повышенной опасности; марковский случайный процесс; уравнение Колмогорова.*

Abstract. The article considers the task of comprehensive assessment of the current to status of risks on major hazard installations and other industrial facilities disaster which entail risks to human life or significant the economic risks. To solve the considered approach based on probabilistic safety condition of the object implemented with the help of Markov chains and Kolmogorov equations. The solution is found subject to a modified system of Kolmogorov equations, implemented in the form of the mathematical Model that takes into account a number of factors, affect the safety of the object. It is expedient to carry out deep and refined calculation. This approach allows assessing the actual risk of the object as a whole and significantly reducing the response time of the administration to restore the safety of the facility.

Key words: *a comprehensive safety assessment; risk reduction; the object of increased danger; Markov process; Kolmogorov equation.*

Введение

Обеспечение комплексной безопасности объектов повышенной опасности (ОПО), является чрезвычайно важной проблемой. Своевременное выявление предвестников аварий и проведение соответствующих мероприятий, направленных на их предупреждение, в значительной степени будут способствовать снижению рисков и позволят избежать развития тяжёлых, иногда фатальных, последствий.

Объектом повышенной опасности называется [1] объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, взрыво- и пожароопасные, опасные химические, биологические и другие вещества, создающие реальную угрозу жизни и здоровью людей, окружающей среде или значительные экономические риски.

На уровень безопасности рассматриваемых объектов действуют различные внутренние и внешние факторы. К ним может относиться воздействие окружающей среды

ISSN 2413–9858

(удары молний, лесные пожары), территориальное расположение объекта, его защищённость, норма загрузки опасных в обращении компонентов промышленного производства в местах их хранения, человеческие ошибки и другие факторы, возникновение которых спрогнозировать достаточно сложно.

Очевидно, что безопасность – понятие комплексное и не может рассматриваться как простая сумма составляющих ее частей. Эти части взаимосвязаны и взаимозависимы [2].

Возникает необходимость в разработке специальной модели комплексной оценки безопасности (КОБ), отражающей динамический процесс изменения состояния безопасности объекта.

Постановка задачи

Рассматриваемые объекты разнообразны по своей структуре, по месту их расположения, по виду и количеству хранимых компонентов промышленного производства, имеют разную степень защиты и т.д. [3]. В связи с этим, для разработки модели КОБ необходимо типовое представление, характерное для большинства подобных объектов (рис.1). Модель объекта, в общем случае, представлена отдельными хранилищами «*K»* (места хранения опасных в обращении компонентов промышленного производства), цехами (участками и т.п.) «*C*», обеспечивающими технологическую обработку (переработку) хранящихся компонентов или осуществляющими производственные процессы, связанные с возможностью возникновения катастроф. Кроме того, на таких объектах, как правило, имеются специальные (аварийно-спасательные) службы «*S*», осуществляющие профилактические меры безопасности, а при необходимости и ликвидирующие на объекте предаварийные ситуации. В случае если службы «*S»* не успевают вовремя ликвидировать какую-либо предаварийную ситуацию, вероятность возникновения катастрофы значительно возрастает.

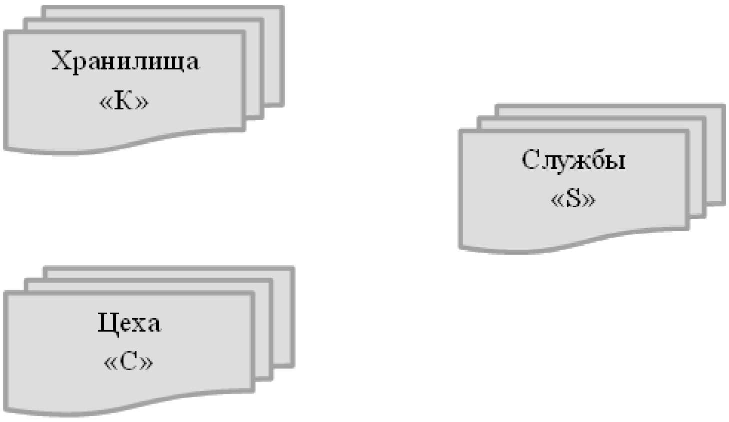

Рисунок 1 - Типовая структурная модель объекта

Таким образом, основной задачей настоящей работы является мониторинг состояния безопасности рассматриваемых объектов и прогнозирования вероятности (p_Σ) того, что на объекте не произойдёт катастрофы за время T.

При известных значениях вероятности безаварийной (нормальной) работы в течение заданного времени для всех хранилищ p_{Nk} и цехов p_{Nc}, искомую вероятность достаточно просто определить по известной формуле:

$$p_\Sigma = \prod_{k=1}^{K}(p_{Nk}) \cdot \prod_{c=1}^{C}(p_{Nc}) \quad (1)$$

ISSN 2413–9858

где: p_{Nk} - вероятность отсутствия катастроф в k-том хранилище; p_{Nc} - вероятность отсутствия катастроф в c-том цехе; K – количество хранилищ на объекте; C – количество цехов на объекте.

Тогда для определения текущей безопасности объекта необходимо решить задачу о вероятности отсутствия катастроф в отдельном хранилище p_{Nk} и цехе p_{Nc}.

Подход к решению задачи

Как правило, для математического описания операций, развивающихся в форме случайного процесса, используют марковские цепи [4]. В нашей модели, это случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. Поэтому для расчета вероятностных характеристик проанализируем подход к решению на основе системы уравнений Колмогорова. Ранее, он был нами подробно рассмотрен в работе [5].

На рисунке 2 представлен граф, отражающий динамический процесс изменения состояния объекта по наиболее вероятностным сценариям развития аварии.

Допустим, что существует три потока событий, переводящие систему из нормального состояния N в одно из предаварийных состояний.

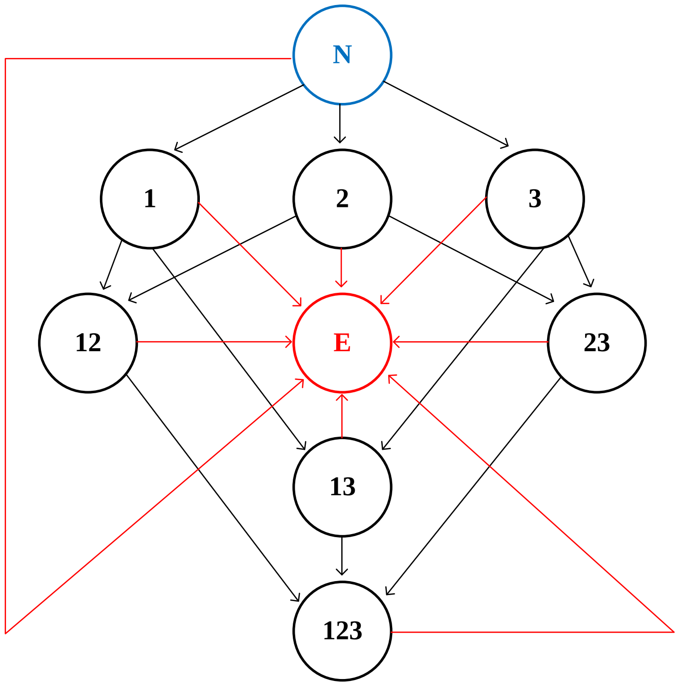

Рисунок 2 - Переход системы из нормального состояния в разнообразные комбинации предаварийных и катастрофических состояний

Система может попасть в катастрофическое состояние E из любого из этих четырёх состояний. Но также она может попасть в комбинированные предаварийные состояния. Из всех этих состояний система может перейти в катастрофическое состояние. Кроме того, существуют и обратные переходы, обеспечивающиеся работой аварийных бригад (сервисных служб). Понятно, что все эти состояния характеризуются разной степенью «тяжести» и, соответственно, потоками событий, переводящих систему в катастрофическое состояние E. В этом случае возникает проблема, заключающаяся в том, что для трёх потоков событий, переводящих систему из состояния N в предаварийное состояние, мы получим 7 различных комбинаций (предаварийных состояний). Для n потоков мы получим 2^n-1 предаварийных состояний. Таким образом, для любой реальной системы, количество уравнений становится огромным. Например, только для двадцати потоков – это уже более 1000000 уравнений и задача вычисления вероятностных характеристик становится практически нерешаемой для любого компьютера.

Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017, Т.3, №4
ISSN 2413–9858

Актуальность проблемы особенно возрастает в период прогнозируемых чрезвычайных ситуаций, таких как пожароопасный сезон, сезон грозовой активности, усиление диверсионной и террористической активности, сезонная смена обслуживающего персонала и многое другое, тогда приходится учитывать значительно большее количество факторов, повышающих риски безопасного состояния объекта. Поэтому, для проведения глубокого, уточненного расчета вероятностного состояния безопасности, возникает необходимость в поиске другого подхода, позволяющего произвести оценку (расчет) параметров безопасности быстрее на несколько порядков.

Математическая модель

Представим систему (т.е. цех или хранилище) принципиально иным способом. Пусть она может находиться только в двух состояниях: в нормальном N и катастрофическом E (рис. 3).

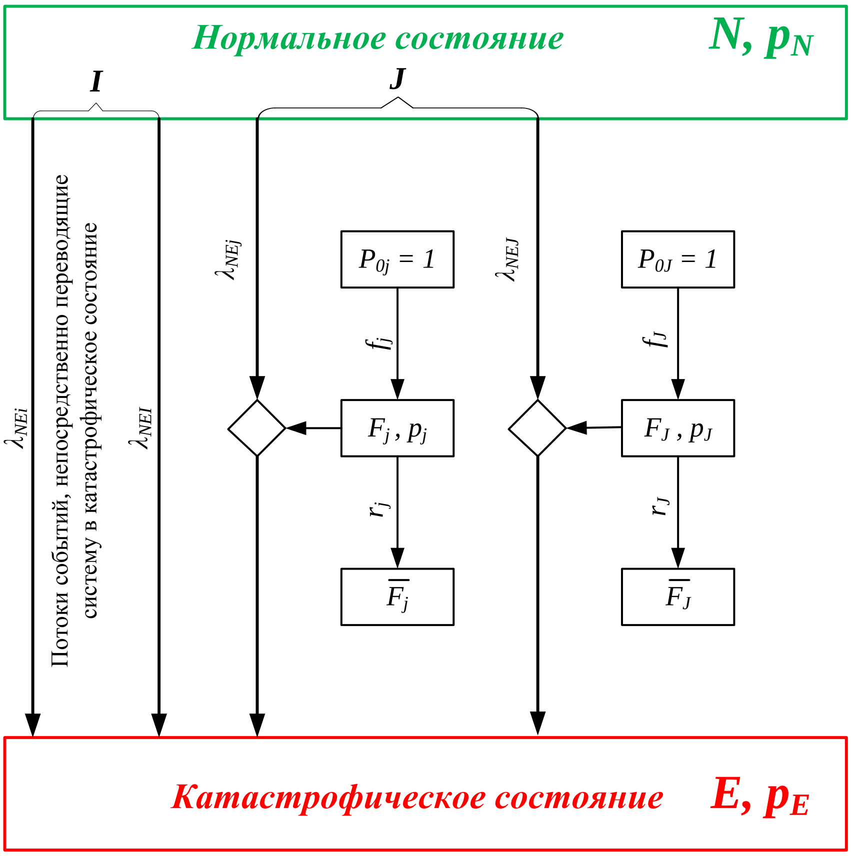

Рисунок 3 - Переход системы из нормального состояния в катастрофическое

Поскольку мы будем рассматривать решение в общем виде для любого хранилища или цеха, здесь и далее опускаем индекс “k” или “c”.

Допустим, что в системе существует два типа потоков событий, переводящих ее в катастрофическое состояние. Первый тип, обозначим как «*I*» – потоки событий λ_{NEi}, непосредственно переводящие систему в катастрофическое состояние E. Это могут быть, землетрясения, активная вулканическая деятельность, внезапные изменения внешних климатических условий, приводящие к ураганам, смерчам, ливням, наводнениям. Второй тип, обозначим как «*J*» – потоки событий λ_{NEj}, переводящие систему в катастрофическое состояние E только при условии существования предаварийного состояния.

Наличие фактора F_j соответствует некоторому предаварийному состоянию. Фактор F_j появляется в результате потока событий f_j , который имеет место при любом состоянии системы (p_{0j} =1). Кроме того, в случае существования фактора F_j , существует поток событий

r_j, приводящий к отсутствию данного фактора $\bar{F}_j$. Этот поток является следствием противодействия возникновению факторов «F», которое может обеспечиваться административной деятельностью на объекте, работой специальных аварийно-спасательных служб и т.п., в зависимости от номенклатуры объекта.

Заметим, что поток событий f_j происходит не из некоторого состояния фактора F_j , а, как бы, из неисчерпаемого (p_{0j} =1) резервуара. В случае $f_j > r_j$, через некоторое время, p_j может превысить единицу. Эту ситуацию следует трактовать как появление в системе не одного, а нескольких одинаковых факторов F_j и, соответственно, кратное увеличение потока событий λ_{NEj}.

Необходимо отметить, что определение значений для потоков λ_{NEi}, λ_{NEj}, f_j и r_j не всегда является простой задачей, поэтому для их оценки, возможно, понадобится помощь экспертов.

Исходя из графической модели, представленной на рис.3, для вероятностей пребывания системы в состояниях N и E, уравнение Колмогорова можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_N}{dt} = -p_N \cdot \sum\limits_{i=1}^{I} \lambda_{NEi} - p_N \cdot \sum\limits_{j=1}^{J} (\lambda_{NEj} \cdot p_j) \\ \dfrac{dp_E}{dt} = p_N \cdot \sum\limits_{i=1}^{I} \lambda_{NEi} + p_N \cdot \sum\limits_{j=1}^{J} (\lambda_{NEj} \cdot p_j) \\ p_N + p_E = 1 \end{cases} \qquad (2)$$

где J – количество потоков «J»; I – количество потоков «I».

Разделяя переменные в первом уравнении системы (2), и интегрируя его от начального момента времени t_0 до t, можно легко получить решение в виде:

$$p_N = p_{N0} \cdot e^{-G_{\lambda fr}(t)} \qquad (3)$$

где p_{N0} - вероятность отсутствия катастроф в системе в начальный момент времени (в обычном случае $p_{N0} = 1$).

$$G_{\lambda fr}(t) = +\int\limits_{t_0}^{t} \left[\sum_{i=1}^{I} \lambda_{NEi} + \sum_{j=1}^{J} (\lambda_{NEj} \cdot p_j) \right] \cdot dt \qquad (4)$$

Кроме того, для решения системы (2) необходимо определить вероятность p_j наличия фактора F_j.

Записав уравнение Колмогорова для p_j, получим:

$$\frac{dp_j}{dt} = f_j \cdot p_{0j} - r_j \cdot p_j \qquad (5)$$

Тогда общее решение для одного хранилища или цеха с учетом (2), (3), (4), (5) и условия p_{0j} =1 может быть записано в виде:

Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017, Т.3, №4
ISSN 2413–9858

$$\begin{cases} P_N = p_{N0} \cdot e^{-G_\lambda fr(t)} \\ p_E = 1 - p_N \\ J\ \{\dot{p}_j + r_j \cdot p_j = f_j \end{cases} \tag{6}$$

Здесь также учтено, что второе уравнение в системе (2) является лишним. Система (6) содержит (J + 2) уравнения, в том числе J уравнений для всех факторов F_j. В общем случае для определения p_E в заданный момент времени, следует решать систему уравнений (6) численными методами.

Для определения вероятности наличия факторов F_j, решаем третье уравнение (или систему из J уравнений) системы (6).

В общем случае, если потоки r_j и f_j являются функциями любых переменных, задача решается численными методами, например, методом Рунге-Кутта с использованием явной, неявной или явно-неявной схем.

Если потоки r_j и f_j зависят только от времени, то каждое из этих J уравнений является неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка и его решение следует искать в виде:

$$p_j = \frac{\int exp\left(\int r_j dt + C_0\right) \cdot f_j dt + C_1}{exp\left(\int r_j\, dt + C_0\right)} \tag{7}$$

где константы C_0 и C_1 определяются граничными условиями.

Некоторые виды функций $r_j(t)$ и $f_j(t)$ позволяют найти аналитическое решение, в других случаях задача также решается численными методами.

Случай, когда потоки f_j и r_j постоянны во времени, представляется наиболее важным с практической точки зрения, как наиболее распространённый. В этом случае с учетом начальных условий ($p_j = p_{j0}$ при $t = t_0$) из (7) можно получить:

$$p_j = \frac{f_j}{r_j} + \left(p_{j0} - \frac{f_j}{r_j}\right) \cdot e^{-r_j(t-t_0)} \tag{8}$$

Это и есть закон изменения во времени вероятности наличия фактора F_j при постоянных потоках событий f_j и r_j. Наличие в системе факторов F_j, в свою очередь, как своеобразный ключ, открывает потоки событий λ_{NEj} и увеличивает вероятность перехода системы в катастрофическое состояние «E» (рис.3).

Анализ уравнения (8) показывает, что при начальной вероятности $p_{j0} > f_j/r_j$ вероятность p_j асимптотически убывает по экспоненте до значения f_j/r_j, уменьшая, тем самым, интенсивность аварийного потока событий $(\lambda_{NEj} \cdot p_j)$, что приводит к снижению риска перехода системы в катастрофическое состояние. И, наоборот, при $p_{j0} < f_j/r_j$ риск перехода в системы в катастрофическое состояние увеличивается, однако конечное значение p_j не зависит от начального.

Отметим, что отношение f_j/r_j может принимать любые положительные значения. Причём значение больше 1, приводит к наличию нескольких однотипных факторов F_j. Поскольку это является свойством системы, то появление нескольких однотипных факторов не вызывает необходимости ни увеличивать количество уравнений, ни вносить коррективы в граф, представленный на рис. 3. Ситуация, при которой появляется несколько однотипных факторов, автоматически приводит только к увеличению соответствующего потока событий λ_j, что выгодно отличает эту модель от предыдущей (рис.2) и позволяет, в конечном итоге, эффективно производить оценку безопасности объекта.

Вернёмся к решению системы (6). При постоянных потоках λ_{NEi}, λ_{NEj}, f_j, r_j .и с учетом (4) и (8) она приобретает вид:

$$\begin{cases} P_N = p_{N0} \cdot e^{-G_{\lambda fr}(t)} \\ p_E = 1 - p_N \\ G_{\lambda fr}(t) = \int_{t_0}^{t} \left[\sum_{i=1}^{I} \lambda_{NEi} + \sum_{j=1}^{J} (\lambda_{NEj} \cdot p_j) \right] \cdot dt \\ J \left\{ p_j = \frac{f_j}{r_j} + \left(p_{j0} - \frac{f_j}{r_j} \right) \cdot e^{-r_j (t - t_0)} \right. \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) содержит J уравнений для всех факторов F_j.

Произведя математические преобразования, из первого уравнения этой системы получаем формулу для определения p_N для одного хранилища (или цеха) в любой момент времени t:

$$P_N = p_{N0} \cdot exp\left\{ - \left[\sum_{i=1}^{I} \lambda_{NEi} + \sum_{j=1}^{J} \left(\lambda_{NEj} \cdot \frac{f_j}{r_j} \right) \right] \cdot (t - t_0) \right\} \cdot \\ \cdot exp\left\{ - \sum_{j=1}^{J} \left[\frac{\lambda_{NEj}}{r_j} \cdot \left(p_{j0} - \frac{f_j}{r_j} \right) \cdot \left(1 - e^{-r_j (t - t_0)} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

Для нахождения вероятности катастрофы P_E для хранилища, необходимо подставить уравнение (10) во второе уравнение системы (6).

Имея экспертные оценки для потоков событий λ_{NEi}, λ_{NEj}, f_j и r_j, и вычислив по формуле (10) значения вероятностей для всех хранилищ p_{Nk} и цехов p_{Nc}, из формулы (1) получаем аналитическое решение для объекта в целом.

Заключение

Решена задача по комплексной оценке текущей вероятности возникновения катастроф на объектах повышенной опасности и других промышленных объектах, катастрофы на которых влекут за собой угрозу для жизни людей или значительные экономические риски.

Получено общее решение для любых зависимостей потоков событий, в том числе, их взаимозависимостей.

Количество дифференциальных уравнений, описывающих объект, как правило, не больше количества факторов влияющих на его безопасность, что позволяет получать численные решения для объектов, практически, любой сложности в реальном времени.

Для важного случая постоянных потоков событий найдено аналитическое решение, позволяющее, в том числе, сделать экспертную оценку потоков на основе имеющегося опыта катастроф.

При использовании представленной модели, появляется реальная возможность получить быструю оценку текущего состояния безопасности объекта, что в свою очередь должно обеспечить снижение времени реакции администрации на возникающие аварийные инциденты, в том числе, в процессе эксплуатации опасных в обращении компонентов промышленного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52551-2016. Системы охраны и безопасности. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2016. 28 с.

2. Безбородова О.Е. Анализ риска опасных производственных объектов: методические указания. Пенза: ПГУ, 2014. 44 с.

3. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере. Москва: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ, 1999. 124 с.

4. Александровская Л.Н., Аронов И.З, Соколов В.П., Цырков А.В. Вероятностные методы анализа безопасности технических систем: учебное пособие. М.: МАТИ, 2001. 232 с.

5. Лосев Е.Ф., Мишин А.М., Кузнецов И.А. Математическое моделирование вероятностной оценки текущего состояния безопасности арсеналов, баз и складов вооружения ВМФ // XX НТК филиала ВУНЦ ВМФ «ВМА»: сборник научных трудов. Калининград, 2017. С.125-128.

6. Ветошкин А.Г., Марунин В.И. Надежность и безопасность технических систем. Пенза: ПГУ, 2002. 129 с.

7. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск. Пенза: ПГУ, 2003. 154 с.

8. Александровская Л.Н., Аронов И.З, Елизаров А.И. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем: учебник. М.: Логос, 2001. 232 с.

REFERENCES

1. GOST R 52551-2016. *Sistemy okhrany i bezopasnosti. Terminy i opredelenija* [System safety and security. Terms and defenitions]. Moscow: Izd-vo standartov, 2016. 28 p.

2. Bezborodova O.E. *Analiz riska opasnyh proizvodstvennykh ob'ektov* [Risk analysis of hazardous production facilities]. Metodicheskie ukazaniya. Penza: PGU. 2014. 44 p.

3. Belov P.G. *Modelirovanie opasnykh protsessov v tekhnosfere* [Modeling of dangerous processes in the technosphere]. Moscow: Izd-vo Akademii grazhdanskoy zaschity MCHS RF. 1999. 124 p.

4. Aleksandrovskaja L.N., Aronov I.Z., Sokolov V.P., Tsyrkov A.V. *Verojatnostnye metody analiza bezopasnosti tekhnicheskikh system* [Probabilistic methods of safety analysis of technical systems]. Uchebnoe posobie. Moscow: MATI, 2001. 232 p.

5. Losev E.F., Mishin A.M., Kuznetsov I.A. *Matematicheskoe modelirovanie verojatnostnoy otsenki tekuschego sostojanija bezopasnosti arsenalov, baz i skladov vooruzhenija VMF* [Mathematical modeling of the probabilistic assessment of the current state of safety of bases and depots of weapons of the Navy]. XX NTK filiala VUNC VMF "VMA": sbornik nauchnykh trudov. Kaliningrad, 2017, pp. 125-128.

6. Vetoshkin A.G., Marunin V.I. *Nadezhnost i bezopasnost tekhnicheskikh system* [The reliability and safety of technical systems]. Penza: PGU, 2002. 129 p.

7. Vetoshkin A.G. Nadezhnost tekhnicheskikh system i tekhnogennyi risk [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Penza: PGU, 2003. 154 p.

8. Aleksandrovskaja L.N., Aronov I.Z., Elizarov A.I. *Statisticheskie metody analiza bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh system* [Statistical methods analysis of safety of complex technical systems]. Uchebnik. Moscow: Logos, 2001. 232 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мишин Андрей Михайлович

Филиал Военного учебного научного центра ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, Россия, адъюнкт кафедры артиллерийского и зенитного вооружения, капитан 2 ранга,

E-mail: mishin-andr@yandex.ru

Mishin Andrey Michailovich

Kaliningrad Branch of the Naval Academy, Russia, post-graduate at the Artillery Department, a captain the 2 rank,

E-mail: mishin-andr@yandex.ru

Лосев Евгений Федорович

Филиал Военного учебного научного центра ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, Россия, доктор военных наук, профессор, профессор кафедры артиллерийского и зенитного вооружения, действительный член Академии военных наук, член Академии военно-исторических наук,

E-mail: losev1947@mail.ru

Losev Evgeniy Fedorovich

Kaliningrad Branch of the Naval Academy, Russia, Doctor of Philosophy in the military sciences, Professor, Professor at the Artillery Department, Member of Academy of military Sciences, Member of Academy of military-historical Sciences,

E-mail: losev1947@mail.ru

Хорозов Сергей Владимирович

Фирма «ЭйчСофт» (“HSoft”) в г. Калининграде, Россия, кандидат технических наук, директор,

E-mail: horgorst@gmail.com

Khorozov Sergei Vladimirovich

Firm “HSoft”, Russia, Philosophy Doctor, director,

E-mail: horgorst@gmail.com

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:
236036, Калининград, Советский проспект, 82, филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА» в г. Калининграде, Лосев Е.Ф. – тел. 8-911-487-70-38, Мишин А.М. – тел. 8-911-474-85-83, Хорозов С.В. – тел. 8-906-239-52-18