

УДК 614.849

В.В. Яковлев, М.В. Гравит, О.В. Недрышкин

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАСЧЕТА ПОЖАРНОГО РИСКА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕШЕХОДНОЙ ДИНАМИКИ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

V.V. Yakovlev, M.V. Gravit, O.V. Nedryshkin

DEVELOPMENT PROSPECTS SOFTWARE COMPLEX FIRE HAZARD CALCULATIONS PEDESTRIAN AND DESIGN PROCESS DYNAMICS UNDER FIRE

Проведен анализ нормативных документов в области расчета пожарного риска. Поставлена проблема игнорирования в современной методике использования методов расчета пешеходной динамики в условиях пожара с учетом психологических факторов. Предложены функциональные составляющие современного программного комплекса для расчета пожарного риска. Проведен сравнительный анализ существующих программных комплексов в области расчета пожарного риска. Дано заключение относительно функциональности исследуемых программных комплексов.

ПОЖАРНЫЙ РИСК; ПЕШЕХОДНАЯ ДИНАМИКА; МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКОГО ПОТОКА; ВРЕМЯ ЭВАКУАЦИИ; ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ПЕШЕХОДНУЮ ДИНАМИКУ.

The analysis of regulatory documents in the calculation of the fire risk. Actualized ignoring the problem in the use of modern methods of calculation methods pedestrian dynamics in fire conditions, taking into account psychological factors. Proposed functional components of modern software for the calculation of the fire risk. A comparative analysis of existing software systems in the calculation of fire risk. Given an opinion on the functionality of software systems studied.

FIRE RISK PEDESTRIAN DYNAMICS MODELS FOOT TRAFFIC; THE EVACUATION; THE EMOTIONAL IMPACT ON THE PEDESTRIAN DYNAMICS.

Риск предполагает ответственность за решения, принятые в условиях неопределенности. Данная ответственность реализуется при выполнении двух условий:

альтернативности (лицо, принимающее решение в той или иной ситуации должно иметь возможность выбора варианта действий, в том числе и бездействия);

стохастичности (решения принимаются в условиях недостаточной информации, при наличии случайных параметров, воздействий, случайного процесса развития событий).

Выбор варианта действий может быть осуществлен на основе решений, полученных при помощи математического моделирования, гарантирующего корректную оценку последствий и выбор оптимального варианта. Использование

при этом детерминистских, а не стохастических моделей оправдано лишь тем, что в математическом отношении первые проще, удобнее; во многих случаях модель процесса представима в виде систем дифференциальных уравнений, теория и методы исследования которых хорошо разработаны [1].

Пожарный риск — это своего рода мера возможной реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей [2].

Оценка пожарного риска проводится при разработке декларации пожарной безопасности или декларации промышленной безопасности на объектах, для которых они должны быть подготовлены в соответствии с законодательством Российской Федерации. При этом порядок про-

ведения расчетов пожарного риска определяется нормативными правовыми актами Российской Федерации, а именно: необходимость проведения расчетов обусловлена требованиями ст. 6, 53, 79 Федерального закона № 123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [2].

Определение расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности выполняется в соответствии с требованиями постановления Правительства РФ № 272 от 31.01.2009 г. «Правила проведения расчетов по оценке пожарного риска» [3]. Компоненты составляющих риска (критерии обеспечения безопасности) могут быть выражены аналитически так:

$$t_{эв} = \sum t_i \leq t_{необ}; \quad (1)$$

$$D_i \leq D_{пр}; \quad (2)$$

$$q_i = \frac{q_{i-1} \times b_i}{b_i} \leq q_{\max}, \quad (3)$$

где t_i — время эвакуации людей на заданном участке, мин; $t_{эв}$ — время эвакуации людей с момента ее начала до момента выхода людей в зону безопасности вне здания, мин; $t_{необ}$ — время, необходимое (допустимое) для эвакуации людей до достижения опасными факторами на участках эвакуации уровней, угрожающих здоровью и жизни людей, мин; D_i — значение плотности людского потока на любом участке его эвакуации, чел./м²; $D_{пр}$ — предельно допустимая величина плотности людского потока, исключающая возможность образования таких их скоплений, в которых взаимное давление людей друг на друга может привести к физическому травматизму и удушью (компрессионная асфиксия), возникновению паники; q_i и q_{i-1} — интенсивность движения, чел./мин, людского потока на смежных — предшествующем ($i - 1$) и рассматриваемом (i) — участках эвакуационного пути, т. е. количество людей, проходящих в каждую минуту через поперечное сечение i -го участка пути; b_i и b_{i-1} — ширина смежных участков пути, м.

Для оценки эвакуации используют два параметра: необходимое время эвакуации до наступления поражающих факторов пожара и смоделированное время эвакуации. Формулы для расчета необходимого времени эвакуации учи-

тывают динамику образования токсичных веществ, выделяемых при горении. А формулы для расчета времени смоделированного процесса эвакуации людей учитывают плотность людского потока, геометрические параметры проекций людей и геометрические параметры внутренних помещений здания (лестницы, проемы, помещения, отсеки).

При определении фактического времени эвакуации людей из помещений и зданий для расчета необходимо выбрать модель движения. Расчет можно производить одним из следующих способов [4]:

по упрощенной модели движения людского потока (определяется время движения одного или нескольких людских потоков от наиболее удаленных мест нахождения людей через эвакуационные выходы (формулы (1)–(3));

по модели индивидуально-поточного движения людей из здания (устанавливается время выхода из здания последнего человека);

по имитационно-стохастической модели движения людских потоков (с учетом поведения людского потока, его реформирования и выравнивания плотности людского потока).

Ведущий комплекс в Российской Федерации, решающий поставленные задачи в области расчетов пожарных рисков, — «СИТИС» (разработан ООО «Ситис»). К достоинствам комплекса относятся: наглядный ввод и редактирование данных; демонстрация результатов расчета; воспроизведение движения людских потоков; детальное представление результатов отчета [5]; использование нескольких — аналитической, индивидуально-поточной, имитационно-стохастической — моделей движения людского потока; расчет необходимого времени эвакуации при помощи интегральной, полевой и зонной моделей.

Вместе с тем с точки зрения эффективности функционирования программы комплекс имеет ряд спорных функций, а именно:

визуализация данных не соответствует физической природе процесса [5];

выходные данные представляют собой массив, непригодный для моментального формирования отчета;

комплекс состоит из набора программ для решения частных задач (СИТИС: Флоутек, СИТИС: Блок, СИТИС: Эватек, СИТИС: Спринт).

Кроме программных комплексов «СИТИС», существуют и другие — Jasmine, Sofie, Fds, Phoenix, Fluent, Cfx, Фогард, GreenLine, TCalc, Z-Model, PojRCalc, Fenix. Комплексы TCalc и PojRCalc с сентября 2011 года предоставляются пользователям бесплатно [6]. В таблице сравниваются три наиболее широко распространенные программы, используемые в России [6].

В европейских и международных стандартах предложена методология выбора сценариев пожара и вероятностная оценка пожарного риска. В Российской Федерации принят ГОСТ Р 51901.10 «Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии» [7], являющийся аутентичным переводом международного стандарта ISO/TS 16732:2005 [8] «Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment» [«Разработка системы пожарной безопасности — Руководство по оценке пожарного риска»]. В развитие стандарта [7] разработан международный стандарт ISO/TS 16733:2006 «Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires» [«Разработка системы пожарной безопасности — Выбор сценариев пожаров и моделей пожаров»] [9], в котором описаны основные принципы отбора сценариев для анализа (а также исключения среди них «незначительных» с точки зрения последствий) и моделей пожаров. Основным недостатком детерминированного подхода считаются определенные консервативные предположения; прежде всего, это выбор наиболее неблагоприятного варианта пожара (так называемый «принцип максимального проектного пожара»). Детерминированный подход дает определенный запас надежности, однако величина этого запаса может стать причиной неоправданных материаль-

ных затрат на обеспечение пожарной безопасности объекта защиты. Вероятностный подход в этом отношении более гибок и совершенен, так как основан на более рациональном сопоставлении опасных факторов пожара, уровня безопасности людей, ожидаемого материального ущерба и, в конечном итоге, затрат на противопожарную защиту. Он дает возможность, например, рассмотреть ликвидацию пожара на ранних стадиях, что существенно снижает негативный эффект его последствий. Но, в свою очередь, при вероятностном подходе возможны ситуации, когда оценка последствий и/или вероятности какого-либо события затруднительна из-за отсутствия достаточного количества необходимой информации или статистических данных [10].

Необходимо отметить, что стохастический подход дает возможность учесть неопределенность как в значениях исходных данных, так и в поведении людей при эвакуации.

Документ PD 7974–7 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment» («Применение принципов пожарно-технического анализа при проектировании зданий. Часть 7: вероятностная оценка пожарного риска») [11] является руководством по вероятностному анализу риска и представляет 7-ю часть серии документов PD 7974 (published documents), выпущенных в дополнение к британскому стандарту BS 7974 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. — Code of practice» («Применение принципов пожарно-технического анализа при проектировании зданий. Свод правил») [12]. Он содержит данные, основанные на статистике пожаров, параметрах здания и показа-

Сравнение расчетных моделей, реализованных в программных комплексах

Расчетный параметр	Модель	Программный комплекс		
		Фогард	Ситис	Fenix+
Фактическое время эвакуации	Упрощенная аналитическая движения людского потока	+ (Фогард-РВ)	+ (Флоутек)	–
	Математическая индивидуально-поточного движения людей	–	+ (Эватек)	+
	Имитационно-стохастическая движения людского потока	–	+ (Флоутек)	–
Необходимое время эвакуации	Интегральная	+ (Фогард-НВ)	+ (ВИМ)	–
	Зонная	+ (Фогард-НВ)	+ (Блок)	–
	Полевая	–	–	+

телях надежности систем противопожарной защиты, необходимые для вероятностной оценки риска, и критерии оценки, которые отражают «безопасность людей» и «безопасность имущества» в абсолютных и относительных показателях. Абсолютным критерием безопасности жизни/здоровья людей является число жертв/пострадавших в год, относительным — уровень риска (частота реализации в течение года событий, в которых люди подвергаются опасности); абсолютным критерием безопасности имущества является среднее значение убытков от пожаров в год, относительным — соотношение затрат/выгод (результаты технико-экономического анализа).

При вероятностной оценке риск рассматривается как функция двух параметров: частот опасных ситуаций и их последствий. Риск — это своего рода мера возможности того, что реализуется последовательность событий, и результатом анализа являются значения, выражающие определенный уровень опасности этих событий для людей или имущества, но также учитывающие, насколько они вероятны. Особенно важен в этом случае анализ событий, обладающих незначительными последствиями, но высокой вероятностью реализации, и событий, обладающих существенными последствиями, но низкой вероятностью реализации. Если события с существенными последствиями и высокими вероятностями всегда включаются в анализ, то события с незначительными последствиями и низкими вероятностями, как правило, исключаются. Для полной оценки риска согласно стандарту ISO/TS 16732:2005 [8] должна быть рассмотрена количественная оценка, условия получения которой определены стандартом ISO/TS 16733:2006 [9], [10].

Таким образом, констатируется общий для всех рассмотренных выше методологий расчета пожарного риска недостаток — отсутствие комплексного подхода к защите человека. Существующие международные и российские нормативные документы, описывающие принцип расчета пожарного риска, не характеризуют степень защищенности человека в условиях пожара. Данные модели описывают развитие пожара, критические факторы воздействия на организм человека, сценарии развития пожара, мобильность эвакуирующихся групп людей, но не учи-

тывают пешеходную динамику человека/толпы в условиях психологических факторов (паника). Последний может оказаться в некоторых ситуациях ключевым фактором, например если в момент пожара возникает паника, которая приводит к блокированию выходов эвакуирующимися в результате давки, падений людей в проходах и на лестничных маршах.

В психофизике известно несколько законов, описывающих отражение внешних воздействий в сенсорном пространстве человека. Их анализ показал, что устанавливаемой взаимосвязи в наибольшей степени может соответствовать так называемый всеобщий психофизический закон Вебера — Фехнера [13]. В той же работе приводятся данные о характере движения людского потока, зависящие от уровня психологического состояния людей (см. рис.) и плотности потока. О влиянии плотности потока на скорость его движения следует судить по относительному изменению значений скорости:

$$RD_j = (V_{\Delta 0j} - V_{\Delta Dj}) / V_{\Delta 0j}. \quad (4)$$

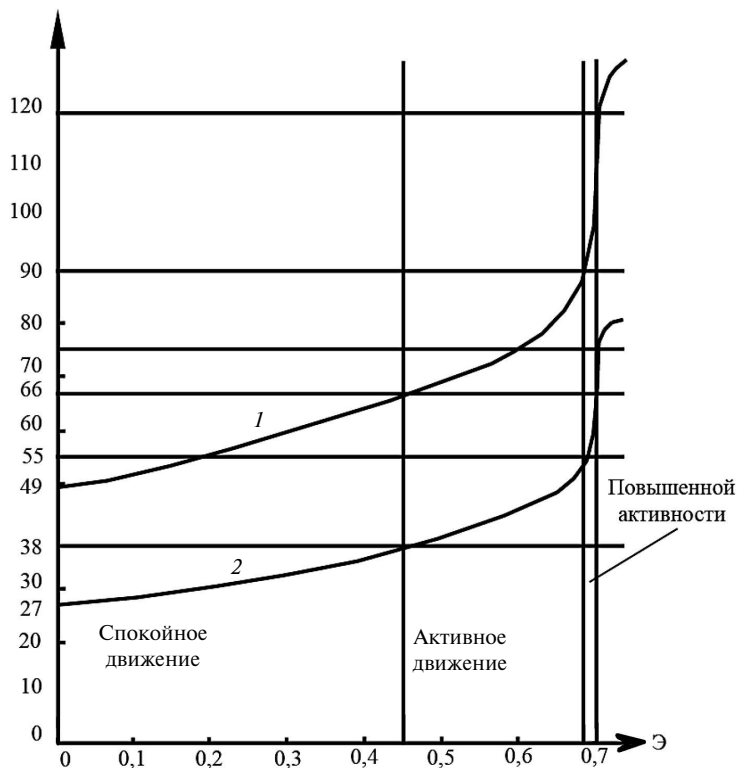
Тогда преобразовав формулу (5), получаем математическое выражение зависимости скорости потока от его плотности и уровня эмоционального состояния людей $V_D = \varphi(D, \Delta)$ для j -го участка пути:

$$V_{\Delta D, j} = V_{\Delta 0, j} (1 - R_{\Delta D, j}), \quad (5)$$

где V_0 — свободное движение людского потока; D — функция плотности людского потока; Δ — функция эмоционального воздействия на движение человека; V_D — скорость потока людей; R_D — относительное изменение скорости.

Общая зависимость случайной величины скорости движения людского потока от его плотности могла быть описана как элементарная случайная функция. Носителем случайности в ней является величина скорости свободного движения $V_{0\Delta}$, значения которой зависят от индивидуальных физических данных составляющих поток людей и особенностей их эмоциональных реакций на ситуацию [13]. С позиций методов математической статистики значение математического ожидания m скорости потока с достоверностью γ будет находиться в интервале

$$V_{0-\varepsilon} < m < V_{0+\varepsilon}; \quad (6)$$



Зависимости скорости потока людей от их эмоционального состояния: 1 — по горизонтальному пути, через проем, по лестнице вниз; 2 — по лестнице вверх

$$\varepsilon = \frac{U_{1+\gamma}}{\sqrt{n}} S, \quad (7)$$

где S — выборочное среднее квадратическое отклонение скорости потока; $\frac{U_{1+\gamma}}{2}$ — квантиль нормального закона распределения; n — объем выборки или общее ожидаемое число людей в потоке [1].

Влияние подобных процессов (и других, инициатором которых может послужить психологическое воздействие паники и стресса) при эвакуации на результат времени эвакуации бесспорен, однако существующие программные комплексы их не описывают. Следовательно, с увеличением времени эвакуации растет вероятность воздействия поражающих факторов пожара на еще не эвакуировавшихся людей, что ведет к увеличению пожарного риска.

Современный программный комплекс по расчетам пожарных рисков должен учитывать опасные факторы пожара, варианты развития пожара

и моделировать динамику эвакуирующихся с учетом психофизических факторов. Моделирование должно основываться не только на физических параметрах, но и на психических [14]. Смоделированная пешеходная динамика людей в условиях пожара должна быть адекватна реальности: результат моделирования не должен «подгоняться» под значение наступления критического фактора (тепловое излучение, наличие кислорода, потеря видимости, концентрация угарного газа). Адекватную математическую модель поведения толпы целесообразно создавать на основе нейронных сетей, но это не исключает уже существующие методы описания пешеходной динамики.

Как представляется авторам, в перспективе модификации программ по расчету пожарного риска должна быть предусмотрена разработка архитектуры универсального программного комплекса, способного рассчитывать пожарный риск с учетом выбранных законодательных баз, опасных факторов пожара и реалистичной модели пешеходной динамики, отражающей поведение людей в экстремальных условиях

пожара. Предполагается следующий набор необходимых функциональных особенностей такого комплекса:

стабильность работы за счет сохранения по технологиям облачной системы хранения данных промежуточных результатов;

содержание в программных отчетах конечных данных, не нуждающихся в последующем редактировании;

использование различных моделей пешеходной динамики (упрощенно-аналитическая, индивидуально-поточная, имитационно-стохастическая);

возможность расчета риска по различным нормативным документам;

учет психологических особенностей и профессиональной подготовки эвакуируемого персонала;

отображение всех сценариев пожара и выбор наиболее вероятного;

универсальность комплекса, содержащего единую программу для расчета фактического и необходимого времени эвакуации;

настройка последовательности вывода данных в конечный отчет, а также редактирования текстового шаблона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковлев В.В.** Экологическая безопасность, оценка риска. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 501 с.

2. **Технический регламент** о требованиях пожарной безопасности: Федеральный Закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.

3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382; введ. 30.06.2009 г. / ФГУ ВНИИПО МЧС России // Российская газета. 2009. № 161.

4. **Туманов А.Ю., Недрышкин О.В., Волков А.П.** Методика комплексной многофакторной рейтинговой оценки безопасности и риска социально-значимых объектов // Сб. науч. тр. IV Всероссийской научно-практ. конф. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 102–108.

5. Заключение специалистов Академии ГПС МЧС России о возможности использования компьютерных программ «СИТИС:Флоутек». <http://sitis.ru/media/documentation/FLT-academia.pdf>

6. **Сухотина М.А., Тихонова Н.В.** Программные комплексы, используемые для определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооруже-

ниях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 4. С. 46–49.

7. **ГОСТ Р 51901.10.** Менеджмент риска. Процедуры управления пожарным риском на предприятии.

8. **ISO/TS 16732:2005.** Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment

9. **ISO/TS 16733:2006.** Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires.

10. **Гилетич А.Н., Еремина Т.Ю., Тихонова Н.В.** Применение международных стандартов BS 7974 и ISO/TS 16733 при оценке пожарного риска // Архитектура и строительство России. 2013. № 2. С. 30–39.

11. **PD 7974–7.** Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment.

12. **BS 7974.** Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice.

13. **Холщевников В.В., Самошин Д.А.** Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.

14. **Короленко Ц.П.** Психофизиология человека в экстремальных условиях. Л., 1978.

REFERENCES

1. **Yakovlev V.V.** Ekologicheskaya bezopasnost, otsenka riska. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 501 s. (rus.)

2. **Tekhnicheskiiy reglament** o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti: Federalnyy Zakon № 123-FZ ot 22 iyulya 2008 g. (rus.)

3. **Metodika opredeleniya raschetnykh velichin pozharного riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeni-yakh razlichnykh klassov funktsionalnoy pozharной opasnosti: prikaz MChS Rossii ot 30.06.2009 g. № 382; vved.**

30.06.2009 g. / FGU VNIIPPO MChS Rossii. *Rossiyskaya gazeta*. 2009. № 161, 2009. (rus.)

4. **Tumanov A.Yu., Nedryshkin O.V., Volkov A.P.** Metodika kompleksnoy mnogofaktornoy reytingovoy otsenki bezopasnosti i riska sotsialno-znachimyykh obyekтов. *Sbornik nauchnykh trudov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost v Chrezvychaynykh Situatsiyakh»*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. Str. 102–108. (rus.)

5. Zaklyucheniye spetsialistov Akademii GPS MChS Rossii o vozmozhnosti ispolzovaniya kompyuternykh programm «SITIS:Floutek». <http://sitis.ru/media/documentation/FLT-academia.pdf>

6. **Sukhotina M.A., Tikhonova N.V.** Programmnyye komplekсы, ispolzuyemyye dlya opredeleniya raschetnykh velichin pozhnarogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyakh razlichnykh klassovfunktsionalnoy pozharной opasnosti. *Pozharovzryvobezopasnost.* 2012. № 4. S.46–49. (rus.)

7. **GOSTR 51901.10.** Menedzhment riska. Protsedury upravleniya pozhnarnym riskom na predpriyatii. (rus.)

8. **ISO/TS 16732:2005.** Fire safety engineering — Guidance on fire risk assessment.

9. **ISO/TS 16733.2006.** Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires.

10. **Giletich A.N., Yeremina T.Yu., Tikhonova N.V.** Primeneniye mezhdunarodnykh standartov BS 7974 i ISO/TS 16733 pri otsenke pozhnarogo riska. *Arkhitektura i stroitelstvo Rossii.* 2013. № 2. S. 30–39. (rus.)

11. PD 7974–7 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment».

12. BS 7974 «Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. — Code of practice». (rus.)

13. **Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A.** Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh: Ucheb. posobiye. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2009. 212 s. (rus.)

14. **Korolenko Ts.P.** Psikhofiziologiya cheloveka v ekstremalnykh usloviyakh. Leningrad, 1978. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЯКОВЛЕВ Вячеслав Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: vv-yakovlev@yandex.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна — кандидат технических наук доцент заместитель заведующего по НИРС кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: marina.gravit@mail.ru

НЕДРЫШКИН Олег Вячеславович — студент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: nedryshkin@gmail.com

AUTHORS

YAKOVLEV Vyacheslav V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vv-yakovlev@yandex.ru

GRAVIT Marina V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina.gravit@mail.ru

NEDRYSHKIN Oleg V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nedryshkin@gmail.com