

Научная статья

УДК 614.839

## **МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСТЕКЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ВЗРЫВА**

**Рыбаков Анатолий Валерьевич;**

✉ **Очетов Серафим Леонтьевич;**

**Рыбакова Анастасия Михайловна.**

**Академия гражданской защиты МЧС России, Москва, Россия**

✉ [s.ochetov@amchs.ru](mailto:s.ochetov@amchs.ru)

*Аннотация.* Изложена методика обоснования рациональных параметров остекления оконных проемов для защиты населения от поражающих факторов взрыва при чрезвычайной ситуации техногенного характера. На основе известных пороговых значений степени поражения человека осколками стекла определяется показатель защищенности населения, который является целевой функцией для обоснования мероприятий по повышению защиты населения. С учетом финансовых ограничений на проведение мероприятий по предупреждению и снижению последствий ЧС техногенного характера предлагается решение оптимизационной задачи по обоснованию мероприятий повышения показателя защищенности населения.

*Ключевые слова:* чрезвычайная ситуация, взрыв, поражающий фактор, воздушная ударная волна, защита населения, остекление оконных проемов

**Для цитирования:** Рыбаков А.В., Очетов С.Л., Рыбакова А.М. Методика обоснования рациональных параметров остекления для защиты населения от поражающих факторов взрыва // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 49–56.

Scientific article

## **METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING RATIONAL GLAZING PARAMETERS FOR PROTECTING THE POPULATION FROM DAMAGING EXPLOSION FACTORS**

**Rybakov Anatoly V.;**

✉ **Ochetov Serafim L.;**

**Rybakova Anastasia M.**

**Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia**

✉ [s.ochetov@amchs.ru](mailto:s.ochetov@amchs.ru)

*Abstract.* The article sets forth a methodology for justifying rational glazing parameters of window openings to protect the population from damaging explosion factors in a man-made emergency. Based on the known threshold values of the degree of human damage by glass fragments, an indicator of population protection is determined, which is a target function for justifying measures to increase population protection. Taking into account financial restrictions on measures to prevent and reduce the consequences of man-made emergencies, it is proposed to solve the optimization task for justifying measures to increase the population protection indicator.

*Keywords:* emergency, explosion, damaging factor, air shock wave, population protection, glazing of windows

**For citation:** Rybakov A.V., Ochetov S.L., Rybakova A.M. Methodology for substantiating rational glazing parameters for protecting the population from damaging explosion factors // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 49–56.

## Введение

При чрезвычайной ситуации (ЧС) техногенного характера в результате взрыва большой мощности зона поражения может выйти далеко за пределы территории потенциально опасного объекта (ПОО) и жилые здания, находящиеся вблизи этих ПОО, могут получить различную степень повреждения от воздействия давления во фронте воздушной ударной волны. Наиболее уязвимым элементом жилого здания является остекление. В своде правил [1] указывается, что при взрыве происходит разрушение элементов зданий, и на людей, находящихся внутри помещения, происходит воздействие поражающих факторов строительных конструкций, таких как: осколки оконных стекол, дверей, перекрытий. Поэтому необходимо заблаговременно проводить оценку опасности и уязвимости жилых домов, расположенных рядом с ПОО, и разрабатывать мероприятия по защите населения от опасностей при возникновении ЧС техногенного характера.

Анализ инцидентов и аварий, произошедших в результате взрыва на ПОО [2–5], указывает, что при прогнозировании последствий техногенных ЧС необходимо учитывать возможное поражения людей осколками стекла. Так, например, в работе [6] сказано о том, что при разрушении остекления в результате взрыва, осколки стекла приводят к механическим повреждениям мягких тканей людей. В статье [7] авторами рассматривается подход, заключающийся в необходимости заблаговременного проведения мероприятий по обоснованию рациональных параметров остекления в оконных проемах жилых зданий для защиты населения от вторичных поражающих факторов взрыва.

## Методы исследования

В статье предлагается методика обоснования рациональных параметров остекления для защиты населения от поражающих факторов взрыва при ЧС техногенного характера на ПОО, в соответствии с научной задачей, сформулированной в статье [8]. Общая структурно-функциональная схема разработанного научно-методического аппарата методики обоснования рациональных параметров остекления показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема научно-методического аппарата методики определения обоснования рациональных параметров остекления для защиты населения от поражающих факторов взрыва при ЧС техногенного характера на ПОО**

Исходными данными для проведения расчетов будут являться:

- расстояние от ПОО до жилых зданий;
- количество и свойства опасного вещества, используемого на ПОО;
- характеристика остекления оконных проемов в жилых зданиях.

Давление во фронте воздушной ударной волны (ВУВ) способно разрушать остекление жилых зданий на большом расстоянии от эпицентра взрыва, причиняя населению осколочные ранения разной степени тяжести. Предполагается, что в результате взрыва на ПОО происходит воздействие давления во фронте ВУВ на оконный проем прямоугольной формы в жилом здании.

В руководящих документах [9, 10] указывается, что разрушение зданий и остекления происходит при следующих значениях давления во фронте ВУВ (табл. 1, 2).

Таблица 1

#### Степень разрушения зданий

Характеристика повреждения здания	Избыточное давление, $\Delta P$ , кПа
Средние повреждения, возможно восстановление здания	28
Разрушение оконных проемов, легкобрасываемых конструкций	14
Частичное разрушение остекления	< 2

Таблица 2

#### Степень разрушения остекления

Характеристика повреждения остекления	$\Delta P$ , кПа
Полное разрушение остекления	7
50 % разрушение остекления	2,5

Соответственно в работе рассматриваются только те жилые здания, которые в результате взрыва на ПОО могут попасть в зону давления во фронте ВУВ от 2 до 27 кПа. Для определения показателя защищенности населения необходимо знать массу и скорость каждого  $i$ -го осколка стекла. Распределение осколков стекла по массе используется из экспериментальных исследований [11], и представлены на рис. 2.

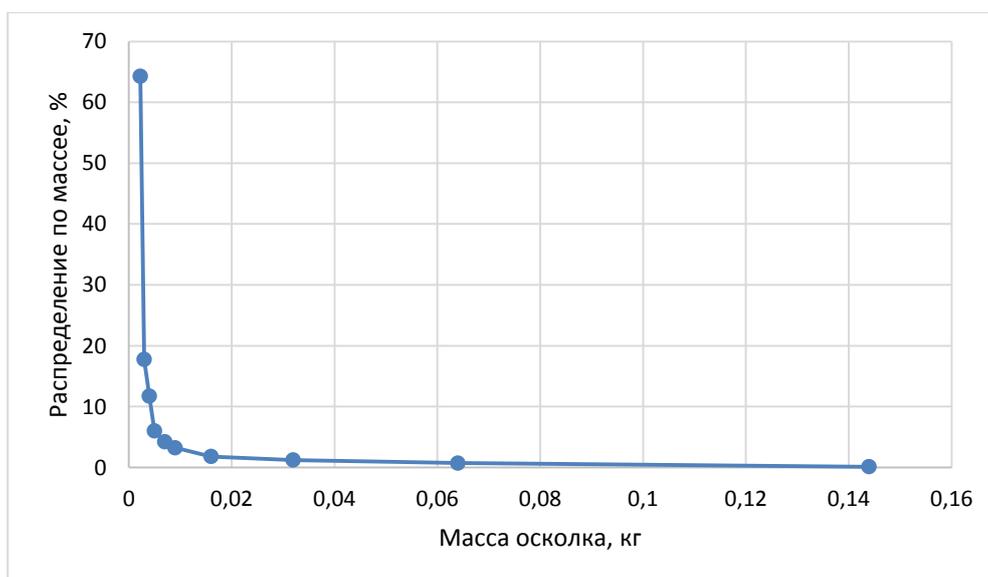


Рис. 2. Распределение осколков стекла по массе

Начальная скорость осколков стекла определяется по формуле, представленной в статье [12]:

$$v_0 = \frac{1}{\rho h} \sqrt{i^2 + (2\xi\Delta P_f - f_d \varepsilon_d) \rho h^2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность стекла, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина стекла, м;  $\Delta P_f$  – давление во фронте воздушной ударной волны, Па;  $i$  – импульс, Па·с;  $\xi$  – поправочный коэффициент, полученный экспериментальным путем [12].

$$f_d \varepsilon_d = \frac{2.109 \times f_{60}^2 \cdot \bar{R}^{-0.03265}}{E},$$

где  $f_{60}$  – прочность на растяжение, Па;  $E$  – модуль Юнга (модуль упругости), Па;  $\bar{R}$  – приведенное расстояние от места взрыва.

Для определения показателя защищенности населения рассматриваются только осколки массой более 1 г, так как они представляют из себя угрозу для жизни человека. Затем, зная массу и скорость  $i$ -го осколка, определяется показатель защищенности населения. Аналитическая зависимость представлена в статье [13] и имеет вид:

$$k_{\text{защ}} = 1 - \max P(m_i, v_i),$$

где  $P$  – вероятность поражения человека осколком стекла;  $m$  – масса;  $v$  – скорость.

### Результаты исследования и их обсуждение

Функция вероятности поражения человека получена на основе ранее известных пороговых значений степени поражения человека осколками стекла [14–17]. Уравнения пороговых значений вероятности поражения человека (для разных масс) получены на основе анализа аналитических зависимостей и эмпирических данных для определения степени поражения человека.

Вероятность поражения человека осколком стекла определённой массы и скорости  $P(m, v)$  будет принимать значение от 0 до 1 и определяться как среднее расстояние между пороговыми значениями вероятностей поражения по оси ОУ как кратчайшая прямая между двумя точками, обозначается как  $d(y_1, y_2)$  и определяется по формуле:

$$d(y_1, y_2) = \sqrt{(y_1 - y_2)^2}.$$

Вероятность поражения человека определяется по формуле и визуально представлена на рис. 3.

$$P(m, v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_0(m) \\ \frac{L \cdot d(v, v_U(m)) + U \cdot d(v, v_L(m))}{d(v, v_U(m)) + d(v, v_L(m))}, & \text{где } L = \operatorname{argmin}_j d(v, v_j(m)), v_j(m) \leq v \\ 1, & v \leq v_1(m) \end{cases}, \quad \begin{cases} U = \operatorname{argmin}_j d(v, v_j(m)), v_j(m) \geq v \\ v_j(m) \in V_{\text{порог}} \end{cases}.$$

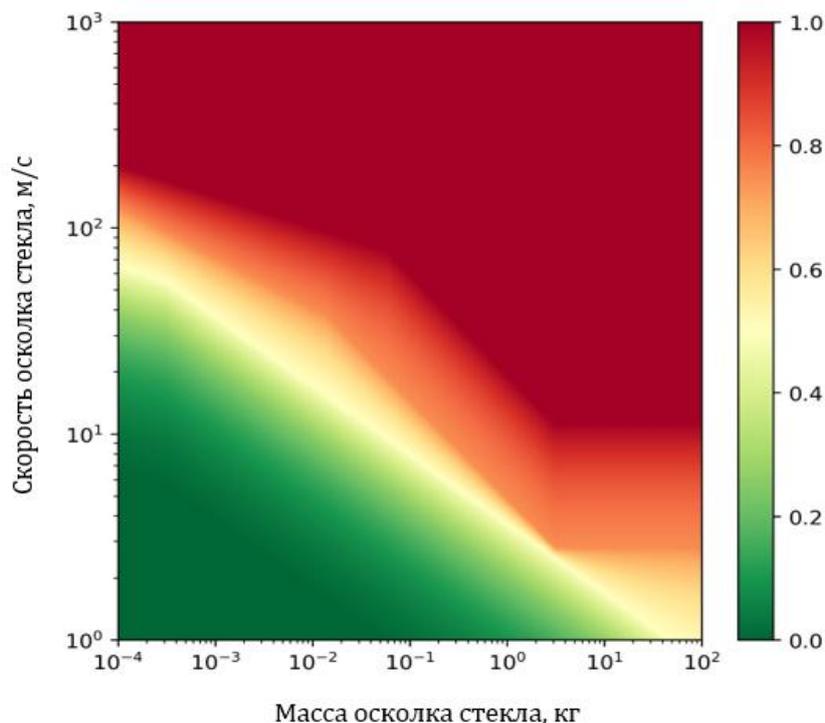


Рис. 3. Значения вероятности поражения человека осколками стекла

Степени поражения человека осколком стекла в зависимости от вероятности поражения представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Степень поражения человека

Зона	Степень поражения
$0 \leq P < 0,5$	Легкое ранение
$0,5 \leq P < 0,75$	Среднее ранение
$0,75 \leq P < 1$	Тяжелое ранение
$P = 1$	Летальный исход

Для снижения степени поражения человека необходимо провести мероприятия по снижению начальной скорости осколка стекла, которая определяется по формуле 1. Снижение начальной скорости осколка стекла возможно за счет проведения следующих мероприятий: изменение характеристик стекла (увеличение толщины стекла ( $Z_1$ ) и изменение прочности стекла на растяжение ( $Z_2$ ) и недопущение разрушения стекла (установка взрывостойкого стекла ( $Z_3$ ) или наклеивание на поверхность стекла специальной полимерной пленки ( $Z_4$ )).

Для каждого из этих мероприятий необходимо определить стоимость изменения характеристик стекла в оконных проемах ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ) в расчете на  $1 \text{ м}^2$ . Затем провести оценку имеющихся ресурсов, выделенных на проведение мероприятий по предупреждению и снижению последствий ЧС техногенного характера (формирование системы ограничений).

После этого известными методами решается оптимизационная задача по определению рациональных параметров остекления для защиты населения от вторичных поражающих факторов взрыва при ЧС техногенного характера на ПОО.

$$v_0 = f(Z) \rightarrow \min_z \quad .$$

$$\begin{cases} 1 \leq Z_1 \leq 25 \text{ (мм)} \\ 30 \leq Z_2 \leq 125 \text{ (МПа)} \\ C_1 \cdot Z_1 + C_2 \cdot Z_2 \leq C^* \quad . \end{cases}$$

### Заключение

Решение данной оптимизационной задачи позволит получить такие параметры стекла, при которых начальная скорость осколков стекла будет минимальной, тем самым снижается степень поражения человека, и повышается показатель защищенности населения. Поэтому органы управления, специально уполномоченные на решение задач в области защиты населения и территорий от ЧС, смогут заблаговременно планировать и проводить комплекс мероприятий по повышению уровня защищенности населения.

Таким образом, решение данной научной задачи и последующая обоснованная реализация ее результатов на практике позволит увеличить уровень защиты населения от вторичных поражающих факторов взрывов при возникновении ЧС техногенного характера, используя рациональные параметры остекления оконных проемов.

### Список источников

1. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 17.02.2023).
2. Дзержинск восстанавливается после взрывов // Коммерсант: последние новости России и мира. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3990686#fid1755007> (дата обращения: 09.02.2023).
3. Взрыв под Петербургом не только уничтожил завод «Авангард», но и разрушил дома поблизости. URL: <https://paperpaper.ru/photos/vzryv-pod-peterburgom-ne-tolko-unicht/> (дата обращения: 02.02.2023).
4. В Рязанской области взрыв на пороховом заводе унес жизни 17 человек // Российская газета. URL: <https://rg.ru/2021/10/25/reg-cfo/v-riazanskoj-oblasti-vzryv-na-porohovom-zavode-unes-zhizni-17-chelovek.html> (дата обращения: 15.02.2022).
5. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году. URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/) (дата обращения: 03.07.2022).
6. Ботяков А.Г. Особенности поражения людей при взрыве большой мощности в городе: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Н. Новгород, 1992. 20 с.
7. Рыбаков А.В., Очетов С.Л. Об оценке воздействия вторичных поражающих факторов взрыва на население при чрезвычайных ситуациях техногенного характера // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2022. № 1 (52). С. 43–49.
8. Формализованная постановка задачи обоснования рациональных параметров остекления оконных проемов для защиты населения от поражающих факторов взрыва при чрезвычайной ситуации техногенного характера / А.В. Рыбаков [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (54). С. 71–79.
9. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: руководство по безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133802> (дата обращения: 21.06.2021).

10. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: руководство по безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420347908> (дата обращения: 09.02.2023).

11. Zhang X., Hao H., Wang Z. Experimental investigation on monolithic tempered glass window responses to blast loads // *International journal of protective structures*. 2015. Vol. 6. № 2. P. 287–309.

12. Ge J., G.-Q. Li, S.-W. Chen theoretical and experimental investigation on fragment behavior of architectural glass panel under blast loading // *Engineering failure analysis*. 2012. Vol. 26. P. 293–303.

13. Рыбаков А.В., Очетов С.Л., Федоровичев Д.С. О показателе защиты населения от вторичных поражающих факторов взрыва при чрезвычайных ситуациях техногенного характера // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 10. С. 39–45.

14. Zhang X.H. Development of design and analysis methods for window structures against blast and impact loads: Doctoral thesis. 2015.

15. Glasstone S. Dolan Philip J. The effects of nuclear weapons – U.S. Department of defense and U.S. Department of energy, 1957. Third edition, 1977. 638 с.

16. Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2-х кн.: пер. с англ. У. Бейкер [и др.]; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986. Кн. 2. 384 с.

17. Defense technical information center. DTIC ADA105824: Glass fragment hazard from windows broken by airblast. DTIC ADA105824 // Defense technical information center. 1980. 40 с.

## References

1. SP 296.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Osobyе vozdeystviya. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (data obrashcheniya: 17.02.2023).

2. Dzerzhinsk vosstanavlivaetsya posle vzryvov // *Kommersant: poslednie novosti Rossii i mira*. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3990686#id1755007> (data obrashcheniya: 09.02.2023).

3. Vzryv pod Peterburgom ne tol'ko unichtozhil zavod «Avangard», no i razrushil doma poblizosti. URL: <https://paperpaper.ru/photos/vzryv-pod-peterburgom-ne-tolko-unicht/> (data obrashcheniya: 02.02.2023).

4. V Ryazanskoj oblasti vzryv na porohovom zavode unes zhizni 17 chelovek // *Rossijskaya gazeta*. URL: <https://rg.ru/2021/10/25/reg-cfo/v-riazanskoj-oblasti-vzryv-na-porohovom-zavode-unes-zhizni-17-chelovek.html> (data obrashcheniya: 15.02.2022).

5. Godovoj otchet o deyatelnosti federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2020 godu. URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/) (data obrashcheniya: 03.02.2023).

6. Botyakov A.G. Osobnosti porazheniya lyudej pri vzryve bol'shoj moshchnosti v gorode: avtor. dis. ... kand. med. nauk. N. Novgorod, 1992. 20 s.

7. Rybakov A.V., Ochetov S.L. Ob ocenke vozdeystviya vtorichnyh porazhayushchih faktorov vzryva na naselenie pri chrezvychajnyh situacijah tekhnogennogo haraktera // *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2022. № 1 (52). S. 43–49.

8. Formalizovannaya postanovka zadachi obosnovaniya racional'nyh parametrov ostekleniya okonnyh proemov dlya zashchity naseleniya ot porazhayushchih faktorov vzryva pri chrezvychajnoj situacii tekhnogennogo haraktera / A.V. Rybakov [i dr.] // *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2022. № 3 (54). S. 71–79.

9. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej: rukovodstvo po bezopasnosti. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133802> (data obrashcheniya: 21.02.2023).

10. Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah: rukovodstvo po bezopasnosti. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420347908> (data obrashcheniya: 09.06.2021).

11. Zhang X., Hao H., Wang Z. Experimental investigation on monolithic tempered glass window responses to blast loads // *International journal of protective structures*. 2015. Vol. 6. № 2. P. 287–309.

12. Ge J., G.-Q. Li, S.-W. Chen theoretical and experimental investigation on fragment behavior of architectural glass panel under blast loading // Engineering failure analysis. 2012. Vol. 26. P. 293–303.
13. Rybakov A.V., Ochetov S.L., Fedorovichev D.S. O pokazatele zashchity naseleniya ot vtorichnyh porazhayushchih faktorov vzryva pri chrezvychajnyh situacijah tekhnogenного характера // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2022. № 10. S. 39–45.
14. Zhang X.H. Development of design and analysis methods for window structures against blast and impact loads: Doctoral Thesis. 2015.
15. Glasstone S. Dolan Philip J. The effects of nuclear weapons – U.S. Department of defense and U.S. Department of energy, 1957. Third edition, 1977. 638 s.
16. Vzryvnye yavleniya. Ocenka i posledstviya: v 2-h kn.: per. s angl. U. Bejker [i dr.]; pod red. Ya.B. Zel'dovicha, B.E. Gel'fanda. M.: Mir, 1986. Kn. 2. 384 s.
17. Defense technical information center. DTIC ADA105824: Glass fragment hazard from windows broken by airblast. DTIC ADA105824 // Defense technical information center. 1980. 40 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 30.04.2023; одобрена после рецензирования: 13.05.2023; принята к публикации: 15.05.2023

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 30.04.2023; approved after review: 13.05.2023; accepted for publication: 15.05.2023

*Информация об авторах:*

**Рыбаков Анатолий Валерьевич**, профессор кафедры высшей математики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), доктор технических наук, профессор, e-mail: anatoll\_rubakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5533-2393>

**Очетов Серафим Леонтьевич**, адъюнкт научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: s.ochetov@amchs.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6968-9992>

**Рыбакова Анастасия Михайловна**, учитель кадетского пожарно-спасательного корпуса Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: a.rybakova@amchs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5975-5745>

*Information about authors:*

**Rybakov Anatoly V.**, professor of the department of higher mathematics of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, microdistrict Novogorsk, Sokolovskaya st., p. 1A), doctor of technical sciences, professor, e-mail: anatoll\_rubakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5533-2393>

**Ochetov Serafim L.**, associate professor of the research center of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, microdistrict Novogorsk, Sokolovskaya st., p. 1A), e-mail: s.ochetov@amchs.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6968-9992>

**Rybakova Anastasia M.**, teacher of the cadet fire and rescue corps Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, microdistrict Novogorsk, Sokolovskaya st., p. 1A), e-mail: a.rybakova@amchs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5975-5745>