

А. С. Едаменко¹, В. А. Лежанко²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

²Центр управления в кризисных ситуациях ГУ МЧС России по Белгородской области;
e-mail: a-edamenko@mail.ru)

ДИАГНОСТИКА ОПАСНОСТЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

РЕЗЮМЕ

Введение. Диагностика опасностей гидротехнических сооружений является крайне актуальной задачей. Безопасность гидротехнического сооружения позволяет защищать жизнь, здоровье и интересы человека, окружающую среду и хозяйственные объекты в результате реализации противоаварийных мероприятий и мер по предотвращению несчастных случаев. Одним из путей снижения опасности является анализ риска аварий подобных объектов с последующей разработкой мероприятий в соответствии с выявленными причинами возможных аварийных ситуаций.

Цели и задачи. Целью работы является оценка риска аварий на гидротехническом сооружении и анализ мероприятий по снижению вероятности возникновения чрезвычайной ситуации на плотине Белгородского водохранилища. Для достижения поставленной цели в работе решался ряд задач: всесторонняя характеристика и особенности эксплуатации исследуемого объекта; составление возможных сценариев аварий на Белгородском гидроузле; моделирование чрезвычайных ситуаций с построением "дерева отказов"; перечень мероприятий по безопасности гидротехнических сооружений Белгородского водохранилища.

Методы исследования. На основе оценки риска аварий гидротехнических сооружений применён метод анализа "дерева отказов". Разработаны в соответствии с декларацией безопасности сценарии возможных аварий, которые сведены в общую схему развития аварий на гидротехнических сооружениях Белгородского водохранилища с учётом каскадности их расположения, то есть в "дерево отказов".

Результаты и их обсуждение. Проведены расчёты вероятностей всех сценариев, которые показали, что среднегодовая вероятность реализации наиболее опасного по уровню риска и последствий сценария аварии, возможного на гидротехнических сооружениях Белгородского водохранилища – катастрофический паводок (сценарий 1) – составляет величину $P_A = 10^{-3}$.

Заключение. Для реализации безопасности гидротехнических сооружений приводится перечень соответствующих мероприятий, которые помогут снизить риск возникновения аварий на исследуемом объекте.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, безопасность, сценарий развития аварии, вероятность аварий, "дерево отказов".

Для цитирования: Едаменко А. С., Лежанко В. А. Диагностика опасностей гидротехнических сооружений на примере Белгородского водохранилища // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 2 (88). – 2020. – С. 63-73. DOI: 10.25257/TTS.2020.2.88.63-73.

Гидротехническим сооружением (ГТС) является инженерное или естественное сооружение для использования водных ресурсов или для борьбы с разрушительным действием воды. Объектом исследования опасности является гидротехническое сооружение Белгородского водохранилища.

Белгородское водохранилище¹ II класса² предназначено для промышленного водоснабжения г. Белгорода и г. Шебекино, а также обеспечения водой орошаемых земель сельскохозяйственных предприятий и улучшения санитарного состояния р. Северский Донец.

Белгородское водохранилище осуществляет годичное регулирование стока реки для водообеспечения населения и хозяйственных объектов, расположенных в бьефах гидроузла, с учётом интересов нижерасположенного Печенежского водохранилища, ведущего регулирование стока.

Регулирующее влияние Белгородского водохранилища, контролирующего около 25 % притока к Печенежскому водохранилищу, полезный объём которого в 4 раза больше регулирующего объёма Белгородского водохранилища, сводится к следующему:

- к увеличению суммарной гарантированной водоотдачи водохранилищ на р. Северский Донец с 425 до 450 млн м³ за счёт использования регулирующего объёма Белгородского водохранилища;
- к уменьшению гарантированной водоотдачи Печенежского водохранилища из-за потерь воды на дополнительное испарение с поверхности Белгородского водохранилища в объёме 10 млн м³;
- к изменению внутригодового распределения притока к Печенежскому водохранилищу.

Эксплуатация Белгородского водохранилища осуществляется по трём основным схемам работы гидроузла: весеннее половодье; межень; зимний период.

Безопасность можно оценить по категориям возможных аварий на ГТС, которые представлены в табл. 1³.

При эксплуатации ГТС всегда существуют источники опасности. Такими источниками опасности ещё на стадии проектирования и строительства ГТС являются [1-2]:

- недостаточный объём изыскательских работ или неправильная оценка инженерно-геологических, гидрологических, климатических условий строительства;
- ошибки в проектировании;
- некачественное производство работ (особенно при строительстве сравнительно небольших сооружений).

¹ https://ru.wikipedia.org/wiki/Белгородское_водохранилище;

² Постановление Правительства РФ № 986 от 2 ноября 2013 г. "О классификации гидротехнических сооружений";

³ Федеральный закон № 117-ФЗ от 21 июля 1997 г. "О безопасности гидротехнических сооружений"

Источники опасности, возникающие на стадии эксплуатации:

- неправильная эксплуатация сооружения;
- низкая квалификация эксплуатационного персонала;
- отсутствие или недостаточный объём мероприятий по обеспечению готовности объекта к локализации и ликвидации аварийной ситуации;
- отсутствие своевременных ремонтных работ.

Таблица 1

Категории возможных аварий на ГТС и тяжесть последствий

Категория аварии	Уровень риска	Тяжесть последствий аварии для персонала и населения	Тяжесть последствий аварии для объекта и материальных ценностей	Тяжесть последствий аварии для окружающей природной среды	Рекомендации по анализу риска
A	Высокий	Гибель людей	Существенный ущерб ГТС и имуществу третьих лиц	Невосполнимые экологические потери	Обязательный детальный анализ риска
B	Существенный	Угроза жизни людей, травмы персонала и населения	Значительные разрушения ГТС и имущества третьих лиц	Существенные экологические потери	Желательный детальный анализ риска
C	Средний	Потери маловероятны	Незначительные повреждения ГТС, потери имущества третьих лиц	Незначительные экологические потери	Рекомендованный анализ риска
D	Низкий	Потери маловероятны	Незначительные повреждения ГТС, потери	Незначительные экологические потери	Анализ риска требуется

Перечисленные возможные источники опасности для ГТС могут инициировать аварии, развивающиеся по следующим сценариям, результаты рассмотрения которых приведены ниже⁴ [3].

Сценарий 1: Катастрофический паводок (обеспеченности, превышающей поверочный случай)

Превышение фактических паводковых расходов по сравнению с расчётными, принятыми в проекте для ГТС II класса, в связи с изменениями природных условий (увеличение площади водосбора или изменение модуля стока) или прохождение расходов более редкой повторяемости → невозможность полной аккумуляции паводка и его сброса через водосбросные сооружения → перелив воды через гребень → разрушение гребневой зоны и плотины в целом → образование волны прорыва с затоплением территории.

⁴ СТП ВНИИГ 230.2.001-00. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений / Под ред. Беллендира Е.Н., Сольского С.В., Никитиной Н.Я. СПб.: ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 2000. С. 125-127

Сценарий 2: *Повышение сверх проектной величины фильтрационных расходов в дренаже, особенно с появлением признаков суффозии*

Вследствие этого, нарушение фильтрационной прочности зоны контакта плотины с основанием, возникновение сосредоточенной фильтрации → размыв материала тела плотины, образование прорана → последующее разрушение плотины, оползание откоса → возникновение волны прорыва с практически полным опорожнением водохранилища и затоплением территории.

Сценарий 3: *Разрушения по контакту земляной плотины с поверхностями водосбросного (водоспускного) сооружения*

Вследствие этого, размыв материала тела плотины, образование прорана в примыкании с паводковым водосбросом → последующее разрушение плотины, оползание откоса → возникновение волны прорыва с практически полным опорожнением водохранилища и затоплением территории в нижнем бьефе плотины. Наиболее тяжёлые последствия имеет разрушение правобережного примыкания к водосбросу, так как здесь напор имеет максимальное значение.

Этот сценарий рассматривается как наиболее вероятный при расчётах по определению границ зоны возможного затопления.

Сценарий 4: *Образование глубокой поперечной трещины в теле плотины*

Неравномерные деформации земляной плотины вследствие особенностей створа, допущенных в процессе строительства отклонений от проекта и некачественной укладки грунтов, нарушения технологии возведения и режима эксплуатации → образование трещин на гребне, оползание участков откосов, образование провалов, промоин → размыв тела плотины с образованием прорана → образование волны прорыва с опорожнением водохранилища или его части → затопление и подтопление территории.

На рис. 1 приведена общая схема развития аварий на гидротехнических сооружениях Белгородской ГТС с учётом каскадности их расположения.

Экспертное ранжирование по уровню риска аварий, возможных на декларируемых сооружениях Белгородской ГТС выполнено согласно "Методическим указаниям по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений".

В табл. 2 приведены результаты экспертного ранжирования аварий, возможных на Белгородской ГТС, по уровню вероятности реализации и последствий⁵.

Количественный анализ дерева отказов сводится к определению вероятности появления головного события и значимости и критичности конкретных предпосылок⁶.

⁵ РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. М.: РАО "ЕЭС России", 2000. С. 113-115;

⁶ Приказ Ростехнадзора № 188 от 13 мая 2015 г. "Об утверждении Руководства по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах"

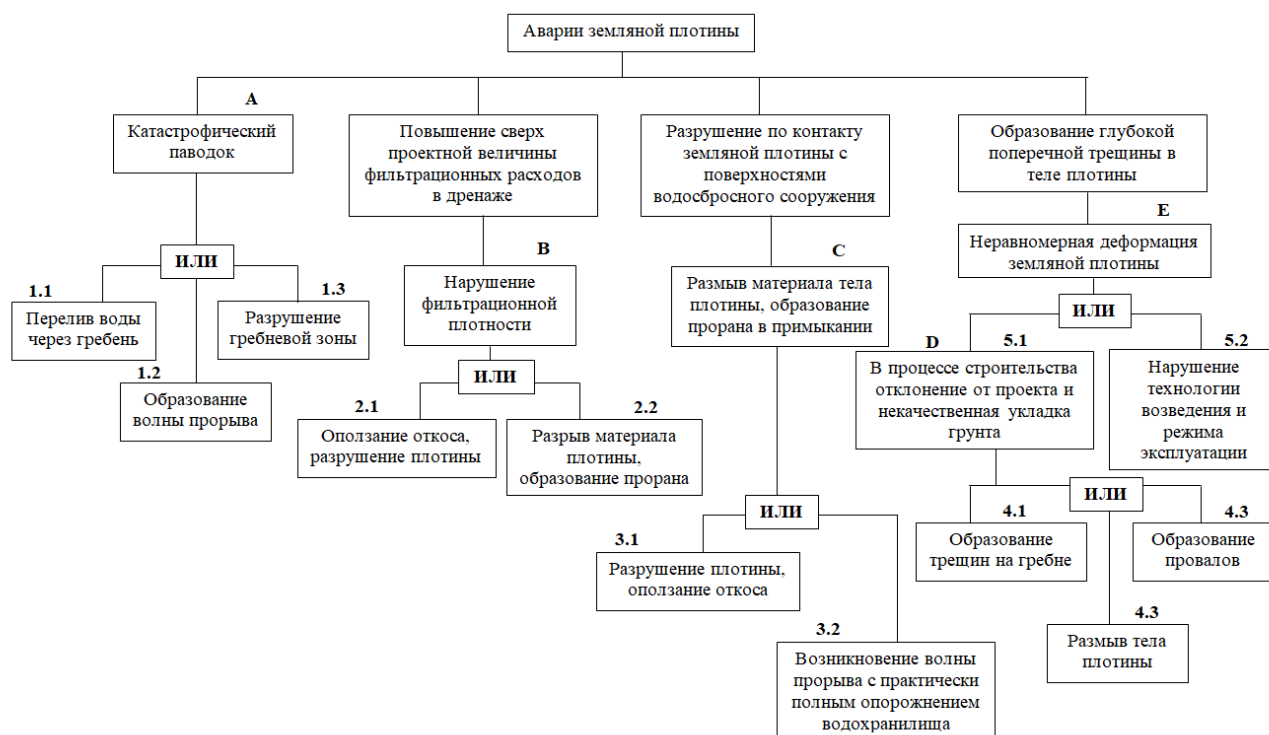


Рис. 1. "Дерево отказов" Белгородского водохранилища

Таблица 2

Матрица экспертного ранжирования аварий Белгородской ГТС
по уровню вероятности реализации и последствий

Сценарий	Краткая характеристика сценария	Экспертная оценка вероятности сценария	Экспертная оценка уровня последствий аварии
1	2	3	4
1.1	Перелив воды через гребень земляной плотины гидроузла в результате катастрофического паводка	Маловероятно	Значительный ущерб
1.2	Образование волны прорыва земляной плотины гидроузла в результате катастрофического паводка		
1.3	Разрушение гребневой зоны земляной плотины гидроузла в результате катастрофического паводка		
2.1	Оползание откоса, разрушение земляной плотины гидроузла в результате нарушения фильтрационной плотности	Маловероятно	Средний ущерб
2.2	Разрыв материала плотины, образование прорана в земляной плотине гидроузла в результате нарушения фильтрационной плотности		

Окончание табл. 2

1	2	3	4
3.1	Разрушение земляной плотины гидроузла, оползание откоса в результате размыва материала тела плотины и образования прорана в примыкании	Маловероятно	Значительный ущерб
3.2	Возникновение волны прорыва в земляной плотине гидроузла с практически полным опорожнением водохранилища в результате размыва материала тела плотины и образования прорана в примыкании		
4.1	Образование трещин на гребне земляной плотины гидроузла в результате отклонения от проекта при строительстве и некачественной укладки грунта	Маловероятно	Значительный ущерб
4.2	Размыв тела земляной плотины гидроузла в результате отклонения от проекта при строительстве и некачественной укладки грунта		
4.3	Образование провалов земляной плотины гидроузла в результате отклонения от проекта при строительстве и некачественной укладки грунта		
5.1	Неравномерная деформация земляной плотины гидроузла в процессе строительства отклонение от проекта и некачественной укладки грунта	Маловероятно	Средний ущерб
5.2	Неравномерная деформация земляной плотины гидроузла при нарушении технологии возведения и режима эксплуатации земляной плотины гидроузла		

Решение "дерева отказов", приведённого на рис. 1, производится по формуле вероятности появления события при соединении событий более низкого уровня логическим условием "ИЛИ" (+):

$$P = 1 - (\prod_{i=1}^n (1 - P_i)),$$

где P_i – среднегодовая вероятность реализации i -го отказа элементов "дерева отказов", которая определена по литературным данным и по гидрологическим данным проекта сооружений (табл. 3).

Результаты расчётов (табл. 4) показали, что среднегодовая вероятность реализации наиболее опасного по уровню риска и последствий сценария аварии, возможного на гидротехнических сооружениях Белгородского водохранилища – катастрофический паводок (сценарий 1) – составляет величину $P_A = 10^{-3}$.

Таблица 3

Численные значения среднегодовых вероятностей отказов и инцидентов,
возможных на гидротехнических сооружениях Белгородского водохранилища

Обозначение элемента "дерева отказов"	Наименование элемента "дерева отказов"	Среднегодовая частота отказа P_i , 1/год;
1.1	Перелив воды через гребень	$P_1 = 10^{-7}$
1.2	Образование волны прорыва	$P_2 = 10^{-3}$
1.3	Разрушение гребневой зоны	$P_3 = 10^{-3}$
2.1	Оползание откоса, разрушение плотины	$P_4 = 10^{-5}$
2.2	Разрыв материала плотины, образование прорана	$P_5 = 10^{-5}$
3.1	Разрушение плотины, оползание откоса	$P_6 = 10^{-5}$
3.2	Возникновение волны прорыва с практически полным опорожнением водохранилища	$P_7 = 10^{-4}$
4.1	Образование трещин на гребне	$P_8 = 10^{-4}$
4.2	Размыв тела плотины	$P_9 = 10^{-5}$
4.3	Образование провалов	$P_{10} = 10^{-5}$
5.1	В процессе строительства отклонение от проекта и некачественная укладка грунта	$P_{11} = 10^{-6}$
5.2	Нарушение технологии возведения и режима эксплуатации	$P_{12} = 10^{-6}$

Таблица 4

Результаты расчёта

№ п/п	Сценарий	Вероятность
1	Катастрофический паводок	10^{-3}
2	Нарушение фильтрационной плотности	10^{-5}
3	Размыв материала тела плотины, образование прорана в при- мыкании	10^{-4}
4	Отклонение от проекта и некачественная укладка грунта в процессе строительства	10^{-4}
5	Неравномерная деформация земляной плотины гидроузла	10^{-6}

Для обеспечения надёжности и безопасности ГТС Белгородского водохранилища выполняются следующие мероприятия⁷:

- регулярные обследования технического состояния водосливной плотины гидроузла;
- разработка рабочей документации на капитальный ремонт дренажных коллекторов водосливной плотины гидроузла;
- текущий ремонт антикоррозионного покрытия металлоконструкций гидроузла и дренажной штольни;
- разработка Правил технической эксплуатации и благоустройства;
- текущий ремонт режимных наблюдательных скважин в посёлках Маслова Пристань и Разумное;
- капитальный ремонт дренажных коллекторов и открылки правобережной водосливной плотины гидроузла;
- разработка Проекта мониторинга безопасности ГТС;
- тарифовка водопропускных сооружений гидроузла и привязка контрольно-измерительной аппаратуры к государственной геодезической сети;
- определение границ водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы.
- разработка "Плана ликвидации аварий на Белгородском водохранилище" и ежегодное дополнение.
- ежегодное проведение противоаварийных тренировок, инструктажей с проверкой знаний работников.

В целом безопасность основных гидротехнических сооружений гидроузла соответствует требованиям современных норм и правил [4-6].

Техническое состояние гидротехнических сооружений Белгородского водохранилища оценивается как исправное, отвечающее современным нормативным требованиям, дальнейшая безопасная эксплуатация обеспечена. На основании выполненных расчётов риска аварии состояние ГТС соответствует нормальному уровню безопасности и не препятствует выполнению сооружением заданных проектом эксплуатационных функций.

Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова⁸

⁷ Постановление Правительства РФ № 1303 от 6 ноября 1998 г. "Об утверждении Положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений" (с изм. от 9 ноября 2016 г.)

⁸ <http://www.bstu.ru/shared/attachments/168264>

Литература

1. Черных О. Н., Волков В. И., Сабитов М. А., Алтунин В. И. О некоторых аспектах оценки размера вероятного вреда в результате аварии гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2014. № 4. С. 46-52.
2. Ефимова Л. Е., Фролова Н. Л. Гидрологический мониторинг в пределах особо охраняемых природных территорий // Вода: химия и экология. 2013. № 5 (59). С. 20-28.
3. Куранов Н. П., Розанов Н. Н., Тимофеева Е. А., Войнич-Сяноженцкий Т. Г. Оценка безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 12. С. 16-22.
4. Мадеева В. С. Анализ современной системы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 1. С. 53-60.
5. Мадеева В. С. Перспективы использования системы удаленного контроля у гидротехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 6. С. 115-119.
6. Назаренко Е. К., Савченков С. Н., Галочкин В. Н. О нормативной правовой базе надзора по Гражданской обороне и защите от чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях // Технологии техносферной безопасности. 2013. Вып. 1 (47). 7 с. <http://academygps.ru/ttb>.

Материал поступил в редакцию 21 апреля 2020 г.; принят к публикации 22 июня 2020 г.

A. S. Edamenko¹, V. A. Lezhanko²

(¹Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, ²Crisis Management Center of Main Directorate of EMERCOM of Russia for Belgorod Region; e-mail: a-edamenko@mail.ru)

DIAGNOSIS OF THE DANGERS OF HYDRO-TECHNICAL INSTALLATIONS ON THE EXAMPLE OF THE BELGOROD RESERVOIR

ABSTRACT

Introduction. Diagnosing the dangers of hydro-technical installations is an extremely urgent task at the present time. The safety of hydro-technical installations allows you to protect human life, health and interests, the environment and household facilities, based on the implementation of emergency measures and to accidents prevention measures. One of the ways to reduce the danger is to analyze the risk of accidents of such facilities with the subsequent development of measures in accordance with the identified causes of possible emergency situations.

Goals and objectives. The aim of the work is to assess the risk of accidents at a hydro-technical installation and analyze measures to reduce the likelihood of an emergency on the dam of the Belgorod reservoir. To achieve this goal, a number of tasks were solved in the work: a comprehensive description and operation characteristics of the investigated object; compilation of possible accident scenarios at the Belgorod hydroelectric complex; emergency modeling with the construction of a "failure tree"; a list of safety measures for the hydro-technical installations of the Belgorod reservoir.

Research methods. Based on the risk assessment of accidents in hydro-technical installations, the "failure tree" analysis has been applied. Scenarios of possible accidents were developed in accordance with the safety declaration, which are summarized in the general scheme of the accidents development at hydro-technical installations of the Belgorod reservoir, taking into account the cascade of their location, that is, in the "failure tree".

Results and its discussion. The probabilities of all scenarios were calculated, which showed that the average annual probability of the most dangerous scenario in terms of the consequences of the accident, possible at hydro-technical installations of the Belgorod reservoir, is a catastrophic flood (scenario 1) is $P_A = 10^{-3}$.

Conclusion. To implement the safety of hydro-technical installations, a list of relevant measures is provided that will help reduce the risk of accidents at the studied object.

Key words: hydro-technical installations, safety, scenario of accident development, probability of accidents, "failure tree".

The work is realized in the framework of the Program of flagship university development on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Edamenko A. S., Lezhanko V. A. Diagnosis of the dangers of hydro-technical installations on the example of the Belgorod reservoir. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (88), 2020, pp. 63-73 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2020.2.88.63-73.

References

1. Chernykh O. N., Volkov V. I., Sabitov M. A., Altunin V. I. About some aspects of assessing the size of probable harm as a result of an accident in hydraulic structures. *Prirodoobustroystvo / Environmental management*, 2014, no. 4, pp. 46-52 (in Russian).
2. Efimova L. E., Frolova N. L. Hydrological monitoring within specially protected natural territories. *Voda: khimiya i ekologiya / Water: chemistry and ecology*, 2013, no. 5 (59), pp. 20-28 (in Russian).
3. Kuranov N. P., Rozanov N. N., Timofeeva E. A., Voynich-Syanozhentsky T. G. Assessment of safety and risk of accidents of hydraulic structures. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika / Water supply and sanitary equipment*, 2012, no. 12, pp. 16-22 (in Russian).
4. Madeeva V. S. Analysis of the modern system for ensuring the safety of hydro-technical facilities. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta / Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*, 2011, no. 1, pp. 53-60 (in Russian).
5. Madeeva V. S. Prospects for the use of remote control systems in hydraulic structures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' / Mountain Information and Analytical Bulletin*. 2011, no. 6, pp. 115-119 (in Russian).
6. Nazarenko E. K., Savchenkov S. N., Galochkin V. N. About regulatory framework of supervision on civil defense and protection from emergency situations on hydraulic structure. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2013, vol. 1 (47), 7 p. Available at: <http://academygps.ru/ttb> (in Russian).

Received 21 April 2020; accepted 22 June 2020

Информация об авторах

ЕДАМЕНКО Алёна Сергеевна
канд. техн. наук; доцент кафедры безопасности жизнедеятельности; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; Российская Федерация, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46; ORCID ID: 0000-0002-7918-5532, РИНЦ Author ID: 658993; e-mail: a-edamenko@mail.ru

ЛЕЖАНКО Виктория Александровна
оперативный дежурный; Центр управления в кризисных ситуациях ГУ МЧС России по Белгородской области; Российская Федерация, 308000, г. Белгород, пр. Славы, 102; ORCID ID: 0000-0002-0245-9478, РИНЦ Author ID: 2361-2396; e-mail: lezhand@mail.ru

Information about the authors

EDAMENKO Alena Sergeevna
Candidate of Technical Sciences; Associate Professor of Department of Life Safety; Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; Russian Federation, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46; ORCID ID: 0000-0002-7918-5532, RSCI Author ID: 658993; e-mail: a-edamenko@mail.ru

LEZHANKO Viktoriya Alexandrovna
duty officer; Crisis Management Center of Main Directorate of EMERCOM of Russia for Belgorod Region; Russian Federation, 308000, Belgorod, Slavi Av., 102; ORCID ID: 0000-0002-0245-9478, RSCI Author ID: 2361-2396; e-mail: lezhand@mail.ru