

УДК [712.5(282.3):627.8.059.22]:[519.2:311]

Г. И. Касперов¹, В. Е. Левкевич², С. М. Пастухов³, Д. С. Миканович³

¹ Белорусский государственный технологический университет

² Институт экономики Национальной академии наук Беларуси

³ Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ШЛАМОХРАНИЛИЩ

В статье приведены результаты исследований, полученные в рамках выполнения научного задания «Исследование устойчивости ограждающих гидротехнических сооружений шламохранилищ и прудов-накопителей мелиоративных и пolderных систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций и оценки возможных ущербов». Выполненные натурные обследования 17 шламохранилищ позволили определить основные критерии оценки технического состояния гидротехнических сооружений, провести оценку состояния низовых и верховых откосов ограждающих сооружений, а также определить факторы, способствующие переработке (абразии) береговой линии шламохранилищ.

С целью оценки влияния процесса безнапорной фильтрации на устойчивость ограждающих конструкций гидротехнических сооружений шламохранилищ, а также прогнозирования возникновения чрезвычайных ситуаций на данном типе сооружений была разработана методика лабораторных исследований и лабораторная установка. Разработанная методика регламентирует порядок проведения исследований по изучению водопроницаемости и суффозионной устойчивости грунтов, применяемых при строительстве гидротехнических сооружений шламохранилищ. Лабораторная установка позволяет проводить исследования водопроницаемости и суффозионной устойчивости образцов грунта или модели сооружения (состоящей из грунта различного гранулометрического состава), определять критические состояния фильтрационного потока, изучать закономерности взаимодействия грунта с фильтрационным потоком (суффозионный вынос грунта), что редко удается сделать в натуральных условиях.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, чрезвычайные ситуации, лабораторные исследования, методика, техническое состояние.

G. I. Kasperov¹, V. E. Levkevich², S. M. Pastukhov³, D. S. Mikanovich³

¹ Belarusian State Technological University

² Institute of Economics of the National Academy of Science of Belarus

³ University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus

FIELD SURVEYS OF DRAINAGE AND POLDER SYSTEMS SLUDGE DEPOSITORIES' TECHNICAL STATE

The article presents the results of the research “Examination of sludge depositories enclosures stability (in drainage and polder systems) for emergency prevention and damage evaluation”. Field surveys of 17 sludge depositories have been conducted. Evaluation criteria for hydraulic structures technical state have been worked out. The state of water-retaining structures downstream and upstream sides has been examined. Factors of sludge depositories shores abrasion wear have been determined.

Laboratory procedures and laboratory model facility have been created to estimate the influence of free filtration on sludge depositories hydraulic structures' stability and to forecast emergency risks for these structures. The methodology determines the procedure of drainage properties and suffosion stability laboratory tests for soils used in sludge depositories' construction. The created laboratory facility allows: to conduct laboratory tests of drainage properties and suffosion stability of soil and of a construction model (made of soils of various grain sizes); to determine critical state of filtration flow and to study the interaction of soil and filtration flow (when soil suffusion occurs) that is rarely possible in the field surveys.

Key words: hydraulic structures, emergencies, laboratory research, methodology, technical state.

Введение. Характеристики фильтрационных свойств грунтов являются важнейшими исходными данными при проектировании лю-

бого напорного гидротехнического сооружения (ГТС). Прежде всего, они необходимы для выбора рациональной схемы его подземного кон-

тура, расчета конструкции водоупорного элемента, а также для оценки фильтрационных потерь, скорости консолидации грунта в основании и т. п. [1, 2]. Кроме того, для прогнозирования возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ГТС шламохранилищ необходимо знать свойства грунтов: водопроницаемость и суффозионную устойчивость; а также оценивать скорость и коэффициент фильтрации жидкости через тело плотины. Именно последняя составляющая является наиболее важной с точки зрения прогнозирования ЧС [3, 4].

В рамках выполнения задания «Исследования устойчивости ограждающих гидротехнических сооружений шламохранилищ и прудов-накопителей мелиоративных и польдерных систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций и оценки возможных ущербов» ГПНИ «Информатика и космос. Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» были проведены натурные обследования на ряде объектов шламохранилищ Республики Беларусь. Методика оценки технического состояния ГТС шламохранилищ разработана на основании данных [5]:

– обследования состояния берегоукрепительных сооружений и верховых откосов земляных плотин (дамб) с целью выявления участков, наиболее подверженных разрушениям;

– визуальных наблюдений за фильтрационными деформациями в нижнем бьефе земляных плотин (дамб) (наличие суффозионного выноса грунта основания и тела плотины (дамбы)).

Основная часть. Обследования состояния верховых откосов плотины включали в себя их осмотр, описание, фотографирование, замер поперечных и продольных деформаций. Всего в период с сентября 2010 г. по настоящее время натурные обследования были проведены на 17 объектах (в том числе некоторые из них многократно) [5].

По результатам натуральных наблюдений было также установлено, что кроме овражной эрозии на указанных объектах активно протекают процессы переработки береговых склонов (абразии), основными факторами которых являются [6] ветровое и волновое воздействие, колебания уровней, вдольбереговые течения, а также возникновения фильтрации в теле плотин (дамб) (рис. 1 и 2).

С целью оценки влияния процесса безнапорной фильтрации на устойчивость ограждающих конструкций ГТС шламохранилищ, а также прогнозирования возникновения ЧС на данном типе сооружений нами была разработана методика лабораторных исследований и лабораторная установка – фильтрационный лоток.



Рис. 1. Повреждения низовых откосов ограждающих сооружений шламохранилищ



Рис.2. Переработка (абразия) береговой линии сооружений шламохранилищ

Разработанная методика регламентирует порядок проведения исследований по изучению водопроницаемости и суффозионной устойчивости грунтов, применяемых при строительстве ГТС шламохранилищ и позволяет:

- определять размеры и размещение противофильтрационных устройств (экранов, ядер и т. п.);
- определять размеры и расположение дренажных устройств, а также осуществлять подбор обратных фильтров;
- определять фильтрационный расход;
- строить кривую депрессии, а в необходимых случаях и сетки движения фильтрационного потока в теле и основании земляной плотины;
- оценивать устойчивость грунтов при механической суффозии и выпоре [7–10].

Лабораторная установка позволяет:

- проводить исследования водопроницаемости и суффозионной устойчивости образцов грунта или модели сооружения;
- не только определять критические состояния фильтрационного потока, но и изучать закономерности взаимодействия грунта с фильтрационным потоком (суффозионный вынос грунта), что по данным [6, 11, 12] редко удается сделать в натуральных условиях.

Лабораторная установка (рис. 3) представляет собой горизонтальную колонку 1 прямоугольного сечения, выполненную из листового металла с глухим закрытым дном. Установка может быть разделена на секции за счет перемещения внутренних перегородок 2. Перегородки разделяют установку герметично, что не допускает перетекания фильтрационного потока из одной секции в другую. Боковая стенка лотка имеет отверстия со штуцерами для подключения пьезометров 3. Со стороны грунта отверстия закрыты металлической сеткой. Все пьезометры выведены на щиток, нуль шкалы которого совпадает с плоскостью сравнения 0–0. В верхней части колонки имеется трубка 4 для поддержания на постоянной высоте уровня воды в приборе. Профильтрованная вода сливается из лотка по сливной воронке 5 с изменяющейся пропускной способностью, расположенной в нижнем бьефе.

Сливные воронки в верхнем и нижнем бьефах устанавливаются на желаемую высоту. Сливную воронку в верхнем бьефе нельзя устанавливать выше отметки гребня плотины.

Затем подается вода в верхний бьеф и после того, как движение фильтрационного потока установится, начинают измерение расхода и положение кривой депрессии. По показаниям пьезометров на щите, приведенным к одной горизонтальной плоскости, фиксируется положение депрессионной кривой. Данные измерений заносятся в журнал работ, по которым производится построение кривой депрессий. На мил-

лиметровую бумагу по данным журнала наносит положения пьезометров и их показания, согласно которым получают экспериментальную кривую депрессии [1]. Разработанная установка обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогичными, а именно позволяет:

- моделировать земляные плотины в различных масштабах за счет перемещения внутренних герметичных перегородок;
- поддерживать различные уровни воды в нижнем бьефе за счет увеличения либо уменьшения пропускной способности сливной воронки;
- изменять конфигурацию размещения пьезометров и проводить исследования на восьми моделях плотин одновременно;
- проводить лабораторные исследования с агрессивными жидкостями.

Исследование фильтрации проводится на модели однородной земляной плотины, установленной в гидравлическом горизонтальном лотке длиной 2,90 м, высотой 0,85 м и шириной 1,2 м. Вдоль оси (рис. 3, б, 2) лотка в основании плотины устанавливаются пять пьезометров (рис. 3, а, 3) для измерения пьезометрической высоты депрессионной кривой.

Пьезометры представляют собой трубки диаметром 0,01 м. Устья трубок и отверстия в стенках закрыты латунными сетками, которые защищают пьезометры от засорения грунтом. По уровням воды в пьезометрах отмечается положение уровня депрессионной кривой на каждой вертикали, проведенной по устьям пьезометров. Вода в верхний бьеф подается из емкости, а для поддержания постоянного уровня в верхнем и нижнем бьефе устанавливаются сливные воронки (рис. 3, 5). Для замера расхода фильтрации используется мерный сосуд и секундомер. Материал грунтовой плотины – разнозернистый песок.

По данным исследований Аравина А. И., Нумерова, С. Н., Чугаева Р. Р., а также согласно требованиям нормативных документов при исследовании движения жидкости в лабораторных условиях, модели ГТС выполнялись таким образом, чтобы они были геометрически подобны действительным сооружениям [7–10, 13–15, 16, 17]. При соблюдении данного условия определенные при испытании моделей величины без изменения можно переносить на натурные условия.

Обработка результатов измерений. По формуле (1) определяется расход фильтрации через грунтовую плотину, а затем единичный расход, см/с:

$$q_p = \frac{Q_0}{B}, \quad (1)$$

где Q_0 – фильтрационный расход; B – ширина лотка.

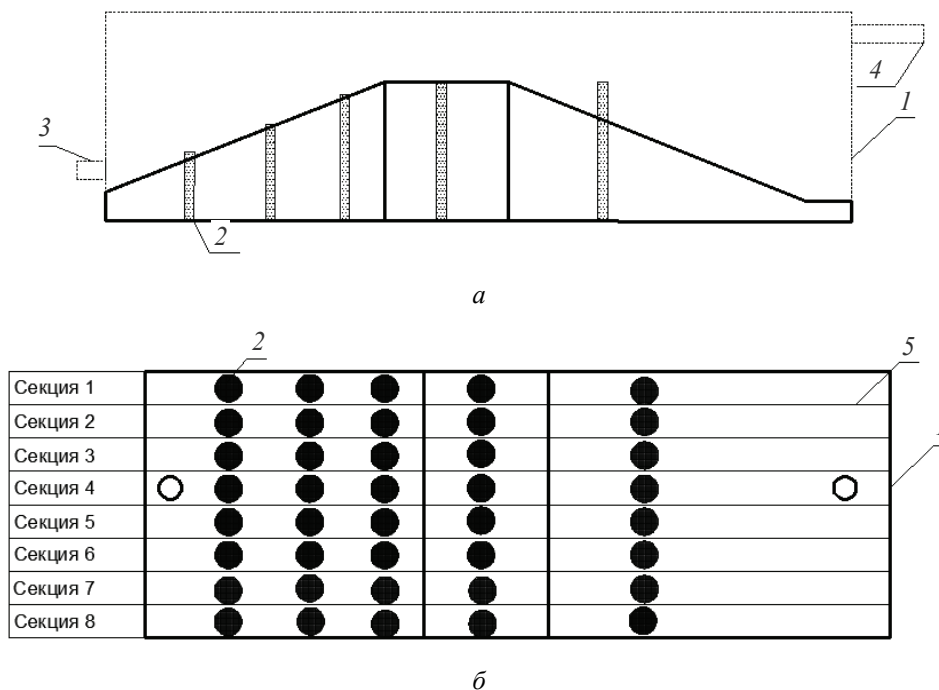


Рис. 3. Схема лабораторной установки:
 а – поперечный разрез; б – план размещения пьезометров;
 1 – корпус лотка; 2 – внутренние перегородки; 3 – пьезометры;
 4 – трубка для поддержания постоянного уровня в верхнем бьефе; 5 – сливная воронка

Удельный расход фильтрации вычисляется по формуле

$$q_v = K_{\phi} \frac{H_1 - H_2}{2L_p}, \tag{2}$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации грунта плотины, см/с; H_1 – высота воды в верхнем бьефе; H_2 – высота воды в нижнем бьефе; L_p – расстояние от разделяющего сечения до точки встречи депрессионной кривой с линией, проходящей по уровню воды в нижнем бьефе, см.

Относительная погрешность вычисленного удельного расхода фильтрации определяется по формуле

$$\delta = \frac{q_p - q_v}{q_p} 100\%. \tag{3}$$

Раздельное сечение проводится по вертикали, проходящей через точку на верховом откосе плотины, заглубленную под уровень воды в верхнем бьефе на величину $H_1 - H_2$. Коэффициент ε принимается равным 0,3–0,4 [8].

Ординаты депрессионной кривой вычисляются по формуле

$$Y = \sqrt{H_1 - 2 \frac{q_v}{K_{\phi}} X}, \tag{4}$$

где X – абсцисса точки депрессионной кривой, для которой находится ордината, см.

Ось OX располагается по линии дна лотка. Начало координат совпадает с раздельным сечением. Все результаты сводятся в таблицу и выполняется полный ее анализ.

При выполнении измерений применяются следующие средства измерений и вспомогательное оборудование: пьезометры; цилиндры мерные 1-500 (ГОСТ 1770), весы лабораторные аналитические (ГОСТ 24104); набор сит с поддоном (ГОСТ 12536); ступка фарфоровая (ГОСТ 9147); чашка фарфоровая (ГОСТ 9147); шкаф сушильный; контрольно-запорная арматура.

Заключение. В результате проведенных натурных обследований объектов шламохранилищ Республики Беларусь определены основные критерии оценки технического состояния ГТС. Проведена оценка состояния низовых и верховых откосов ограждающих сооружений, а также определены факторы, способствующие переработке (абразии) береговой линии шламохранилищ.

Для исследований безнапорной фильтрации в теле земляной плотины и изучения закономерности движения фильтрационного потока, положения кривой депрессии, а также определения удельного фильтрационного расхода и коэффициента фильтрации грунта с целью прогнозирования возникновения ЧС на ГТС шламохранилищ была разработана методика лабораторных исследований и экспериментальная

установка – фильтрационный лоток, отличающаяся тем, что имеется возможность моделировать земляные плотины в различных масштабах за счет перемещения внутренних герметичных перегородок и изменения структуры размеще-

ния пьезометров, а также поддерживать различные уровни воды в нижнем бьефе за счет увеличения либо уменьшения пропускной способности сливной воронки и проводить исследования с агрессивными жидкостями.

Литература

1. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость: утв. М-вом энергетики и электрификации СССР 24 февр. 1983 г. Текст по состоянию на 1 дек. 1985 г. М., 1983. 38 с.
2. Прохоров Н. Н. Методы оценки технического состояния ограждающих дамб шламохранилищ калийного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2009. 20 с.
3. Малик Л. К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблема безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.
4. Jung H. G. Hydrogeochemical Groundwater Monitoring in Mailuu-Suu, Kyrgyz Republic. Final Report of Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). Hannover, 2008. 81 p.
5. Пастухов С. М. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах Республики Беларусь, расположенных в каскадах: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011. 132 л.
6. Левкевич В. Е. Переработка берегов малых водохранилищ мелиоративных систем, ее прогноз и управление (на примере Белорусской ССР): дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1986. 135 л.
7. Cisler J., yKuraz V. Zarizenikesledovanistavu a pohybu v nenasycenezemine // Vodni Hospodarstvi. 1971. № 12, ser. A. P. 341–344.
8. Bouwer H. Unsaturated flow in groundwater hydraulic // Proc. ASCE. 1964. Vol. 90, No. HY5. P. 17–34.
9. Corey A. T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil // Proc. Soil Sci. Soc. Am. 1957. Vol. 21. P. 7–10.
10. Amar S., Dupny H. Etude stir la permeabilite des sols fins mesureeenlaboratoire // Lab. Ponts-Chauss., Rapp. Rech. 1973. № 23. P. 1–34.
11. Исследование безнапорной фильтрации в теле грунтовой плотины для выявления аварийных ситуаций в лабораторных условиях [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnauka.com/4_SND_2011/Ecologia/2_79046.doc.htm (дата обращения: 28.04.2015).
12. Водчиц Н. Н., Мороз М. Ф. Методические указания по проведению лабораторных работ по курсам «Гидротехнические сооружения» и «Гидротехнические сооружения на дорогах». Брест: БрПИ, 1998. 33 с.
13. Гидротехнические сооружения. Строительные нормы проектирования = Гідратэхнічныя збудаванні. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.04-169-2009. Введ. 30.12.09. Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. 45 с.
14. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1948. 225 с.
15. Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). 4-е изд. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд., 1982. 672 с.
16. Лиштван И. И., Парфенок В. И., Лучков А. И. Экологические проблемы в Белоруссии и пути их научного решения // Экологические проблемы в Белоруссии. 2001. С. 111–116.
17. Козлов П. П., Шутина Т. П., Иванов Г. П. Декларация безопасности шламохранилищ ОАО «Беларуськалий». Минск, 2008. 106 с.

References

1. *Rekomendatsii po metodike laboratornykh ispytaniy gruntov na vodopronitsaemost' i suffozionnuyu ustoychivost'* [Recommendations on methodology of laboratory tests of soil drainage properties and suffo-sion stability]. Moscow, 1983. 38 p.
2. Prohorov N. N. *Metody ocenki techniceskoho sostojnija ograzhdayushchih damb shlamohranilishch kalijnogo proisvodstva: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods for examination of potassium production sludge depositories enclosures technical state: abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 2009. 20 p.
3. Malik L. K. *Faktory riska povrezhdeniy gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Risk factors for hydraulic structures, safety issues]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 354 p.
4. Jung H. G. Hydrogeochemical Groundwater Monitoring in Mailuu-Suu, Kyrgyz Republic. Final Report of Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). Hannover, 2008. 81 p.
5. Pastukhov S. M. *Ocenka riska vosniknovenij chresvuchaunuh situaciu na gidrouslah Respubliki Belarus: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Evaluation of emergency risks in cascade water facilities in the Republic of Belarus: dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 2011. 132 p.

6. Levkevich V. E. *Pererabotka berehov malych vodohranilishch meliorativnych sistem, ee prognoz i upravlenie (na primere Belorusskoy SSR): dis. ... kand. tekhn. nauk* [Treatment of small reclamation ponds shores, management and forecast (as it was in BSSR): dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 1986. 135 p.
7. Cisler J., yKuraz V. Zarizenikesledovanistavu a pohybu v nenasycezemine. *VodniHospodarstvi*, 1971, no. 12, ser. A, pp. 341–344.
8. Bouwer H. Unsaturated flow in groundwater hydraulic *Proc. ASCE*, 1964, vol. 90, no. HY5, pp. 17–34.
9. Corey A. T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 1957, vol. 21, pp. 7–10.
10. Amar S., Dupny H. Etude stir la permeabilite des sols fins mesureeenlaboratoire *Lab. Ponts Chauss., Rapp. Rech.*, 1973, no. 23, pp. 1–34.
11. Laboratory Emergency Risks Tests of Free Filtration inside an Earthen Dam. Available at: http://www.rusnauka.com/4_SND_2011/Ecologia/2_79046.doc.htm (accesed: 28.04.2015).
12. Vodchits N. N., Moroz M. F. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu laboratornykh rabot po kursam "Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya" i "Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya na vodakh"* [Laboratory procedures for courses "Hydraulic structures" and "Hydraulic structures on roads"]. Brest, BrPI Publ., 1998. 33 p.
13. ТКР 45-3.04-169-2009. Hydraulic Structures. Construction Design Code. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 45 p. (In Russian).
14. Aravin V. I., Numerov S. N. *Filtracionnye raschety gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Leakoff estimations for hydraulic structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1948. 225 p.
15. Chugaev, R. R. *Gidravlika (tehnicheskaj mehanika gidkosti)* [Hydraulics (Engineering Mechanics of Fluids)]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 672 p.
16. Lishtvan I. I., Parphenyuk V. I., Luchkov A. I. Issues and Scientific Solutions of Environmental Problems in Belarus. *Ekologicheskie problemy v Belorussii* [Environmental Issues in Belarus], 2001, pp. 111–116 (In Russian).
17. Kozlov P. P., Shutina T. P., Ivanov G. P. *Deklaraciya bezopasnosti shlamochranilishch OAO «Belaruskalii»* [Sludge Depositories' Safety Declaration in Belaruskaliy, JSC]. Minsk, 2008. 106 p.

Информация об авторах

Касперов Георгий Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kgi59@tut.by

Левкевич Виктор Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором экологоэкономических проблем Института экономики Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова, 1, корп. 2, Республика Беларусь). E-mail: eco2014@tut.by

Пастухов Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, начальник факультета подготовки руководящих кадров. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь).

Миканович Дмитрий Станиславович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь). E-mail: dimon-cas@mail.ru

Information about the authors

Kasperov Georgiy Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kgi59@tut.by

Levkevich Viktor Evgenyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Environment and Economy Issues Department. Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (1/2, Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eco2014@tut.by

Pastukhov Sergei Mikhailovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Faculty for Senior Staff Training. University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus).

Mikanovich Dmitriy Stanislavovich – Master of Engineering, Senior Lecturer of Fire Fighting and Fire Rescue Equipment Department. University of Civil Defence of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dimon-cas@mail.ru.

Поступила 09.11.2016