ЕВРОПЕЙСКИЕ И РОССИЙСКИЕ КОНЦЕПЦИИ ОЦЕНКИ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ ИЗ-ЗА ОТКАЗА ОБОРУДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ ГАЗА

О.А. Ковальчук, Е.П. Завадская

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ. Настоящая статья посвящена рассмотрению европейских методик оценки риска возникновения аварийной ситуации из-за отказа оборудования на объектах изотермического хранения газа и сравнению этих методик с российскими.

В европейских методиках выделяются два уровня анализа риска. На первом уровне все параметры принимаются постоянными. В основном, специалисты обходятся в работе анализом этого уровня, так как он является более лаконичным и соответствует надежности объекта. Ко второму, более сложному, уровню анализа прибегают в случае нестандартных аварийных ситуаций.

Согласно российским стандартам, анализ риска проводится для каждого опасного производственного объекта индивидуально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вероятность выхода из строя, общая частота отказа, коэффициент ущерба, коэффициент системы управления, область поражения, анализ риска, первый уровень анализа, второй уровень анализа

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ковальчук О.А., Завадская Е.П. Европейские и российские концепции оценки риска возникновения аварийной ситуации из-за отказа оборудования на объектах изотермического хранения газа // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4 (103). С. 390–395. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.390-395

EUROPEAN AND RUSSIAN CONCEPTS OF THE RISK ESTIMATION OF EMERGENCY SITUATION DUE TO THE EQUIPMENT FAILURE AT ISOTHERMAL GAS STORAGE FACILITIES

O.A. Kovalchuk, E.P. Zavadskaya

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337

ABSTRACT. Article is devoted to the consideration of European methods of estimating the risk of an emergency situation due to the equipment failure at isothermal gas storage facilities and comparing these methods with Russian ones.

In European methods, two levels of risk analysis are distinguished. At the first level, all parameters are assumed constant. In general, specialists analyze this level in their work, because it is more concise and corresponds to the facility reliability. The second level of analysis is more complex and resorted to unusual emergency situations.

According to Russian standards, risk analysis is carried out for each hazardous facility individually.

KEY WORDS: failure probability, total failure rate, damage coefficient, control system coefficient, damage area, risk analysis, first level of analysis, second level of analysis

FOR CITATION: Koval'chuk O.A., Zavadskaya Ye.P. Yevropeyskiye i rossiyskiye kontseptsii otsenki riska vozniknoveniya avariynoy situatsii iz-za otkaza oborudovaniya na ob'yektakh izotermicheskogo khraneniya gaza [European and Russian Concepts of the Risk Estimation of Emergency Situation due to the Equipment Failure at Isothermal Gas Storage Facilities]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 4 (103), pp. 390–395. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.390-395

Согласно европейской методике [1], вероятность выхода из строя, или вероятность повреждения, i -го компонента за время t рассчитывается по формуле объекта хранения газа

$$P_f(t) = \text{gff} \cdot D_f(t) \cdot F_{MS}, \quad (1)$$

где gff — общая частота отказа (generic failure frequency), т.е. произведение частот отказа рас-

считываемых компонентов; $D_f(t)$ — коэффициент повреждения (damage factor); F_{MS} — коэффициент системы управления (management system factor). Коэффициенты $D_f(t)$ и F_{MS} являются поправочными.

Общая частота отказа рассчитана для четырех основных типов изотермических резервуаров (ИР) [2].

Частота отказа gff рассматриваемого компонента используется в том случае, если из-за возникновения отказа этого компонента когда-либо был нанесен ущерб конкретному или аналогичному резервуару.

Далее общая частота отказа $gff \approx \Pi_i gff_i$ умножается на коэффициент повреждения — это делается для учета надежности управления рассматриваемым объектом.

Коэффициент системы управления относится к механической комплектации резервуара. Другими словами, поправочный коэффициент системы управления прямо пропорционален качеству механической комплектации объекта; F_{MS} — табличная, всегда положительная величина.

Коэффициент повреждения (иначе — ущерба) $D_j(t)$ определяется на основании:

- соответствующих механизмов повреждения, таких как локальная или общая коррозия, трещины, ползучесть;
- методов контроля [3], используемых для количественной оценки ущерба.

Смысл коэффициента повреждения заключается в статистической оценке размера ущерба. Оценка размера ущерба — это функция от времени обслуживания и от инспекционной деятельности объекта.

Поражающие факторы определяются для следующих видов повреждений [4]:

- утончение листа;
- повреждение элементов внешней оболочки;
- внешние повреждения: коррозия и коррозионное растрескивание;
- коррозионное растрескивание под напряжением (внутреннее под воздействием технологической жидкости в соответствии с условиями эксплуатации объекта);
- высокотемпературная водородная коррозия;
- механическая усталость;
- хрупкое разрушение (в т.ч. при низких температурах хрупкого разрушения, отпускной хрупкости, хрупкости 885 °F и хрупкости сигма-фазы).

Если присутствует более одного вида повреждения, то возникает суперпозиция [5]. В этом случае определяется общий коэффициент повреждения [1].

Перед тем, как приступить к оценке риска возникновения аварии по европейским методикам, следует определить некоторые параметры [5].

Шаг 1. Определение характеристик объекта:

- внутренний диаметр резервуара D , мм;
- толщина потерь металла $Loss$, мм;
- возможный допуск на коррозию FCA (Feature Corrosion Allowance), мм;
- допустимый коэффициент запаса (Remaining Strenght Factor allowable) $RSFa = 0,9$;
- толщина стенки, измеренная в момент оценки t_{rq} , мм.

Шаг 2. Определение толщины стенки, участвующей в оценке,

$$t_c = t_{rq} - FCA, \quad (2)$$

где индекс c обозначает компонент (component), т.е. рассматриваемый участок стенки, участвующий в оценке.

Шаг 3. Определение матрицы поражения $w_{\max}$.

Шаг 4. Определение соотношения толщин стенок (ratio of wall thickness)

$$R_{wt} = \frac{t_c + FCA - w_{\max}}{t_c}. \quad (3)$$

Шаг 5. Определение максимально допустимого рабочего давления MAWP (Maximum Allowable Working Pressure), МПа, для компонента с использованием толщины и шага 2:

$$MAWP = \frac{2St_c}{2R_c + t_c}, \quad (4)$$

где S — напряжение при расчетной температуре (Stress Value at Design Temperature).

Шаг 6. Сравнение фотографий зоны поражения со стандартными схемами поражений.

Шаг 7. Определение коэффициента остаточной прочности RSF (Remaining Strenght Factor) из таблицы.

Первый уровень анализа нужен в следующих случаях [6]:

- соотношение толщин стенок R_{wt} больше 0,2; $R_{wt} > 0,2$;
- RSF — табличное значение (выбирается в связи со схемой повреждения и с соотношением толщин стен) больше коэффициента запаса: $RSF > RSFa$.

На первом уровне анализа оцениваются последствия выброса опасного вещества для эталонных газов, т.е. для газов, чьи физические и химические свойства известны [1].

Область поражения рассчитывается в соответствии с параметрами резервуара, объемом истечения жидкости, высотой истечения.

Вероятность горения газа, вероятность замедленного горения и другие вероятности первого уровня анализа являются табличными величинами, выбираются в соответствии с рассматриваемым газом.

Таким образом, участок поражения CA (Consequence impact Area) определяется по формуле [1]

$$CA = aX^b, \quad (5)$$

где переменные a и b — табличные значения; X — размер отверстия.

Вероятность горения по заданным областям разбиения:

$$CA^{\text{flam}} = \left(\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n CA_n^{\text{flam}}}{gff_{\text{total}}} \right).$$

Общая частота отказа, характерная для данного компонента gff_{total} ,

$$gff_{total} = \sum_{n=1}^4 gff_n.$$

На первом этапе анализа единственными входными данными являются основные свойства газов. Также требуется определить скорость высвобождения газа. Если это не представляется возможным, в расчетах используется полная масса вещества в жидком состоянии.

Для токсичных веществ ход действий аналогичен.

Ко второму уровню анализа переходят в том случае, если рассматриваемый газ не является эталонным или авария развивается нетипичным образом [7].

Второй уровень анализа необходим в следующих случаях:

- рассматриваемый газ не является эталонным;
- хранимый сжиженный газ близок к критической точке [8];
- воздействие двухфазных газо- (паро-) жидкостных выпусков (потоков) [9], а также вымывание дождем должны быть включены в оценку;
- произошел взрыв от расширяющихся паров кипящей жидкости;
- произошел герметичный негорючий взрыв [10];
- метеорологические допущения использовались в расчетах дисперсии.

После расчета физических свойств новообразовавшейся газовой смеси определяется фаза истечения сжиженного газа с учетом двухфазного высвобождения.

Также в рамках анализа второго уровня определяется рассеивание облака по рассматриваемой области. Это делается затем, чтобы впоследствии оценить количество горючей массы или токсическую концентрацию всего облака паров.

В отличие от характеристик первого уровня анализа, вероятностные характеристики второго уровня анализа не являются постоянными величинами.

Количественная оценка риска $R(t)$ — временная функция, она зависит от вероятности отказа и области поражения:

$$R(t) = P_f(t)C(t). \quad (6)$$

Следует отметить, что вероятность отказа $P_f(t)$ является функцией времени, а область поражения $C(t)$ — неизменна во времени. Таким образом, уравнение (6) можно переписать в зависимости от того, выражается ли риск как поражение по области или как финансовые затраты от поражения:

риск поражения по области

$$R(t) = P_f(t) \cdot CA; \quad (7)$$

риск финансовых затрат

$$R(t) = P_f(t) \cdot FC, \quad (8)$$

где FC (Financial Consequence), как и CA, — неизменная со временем функция.

После оценки риска составляется план последующих осмотров объекта.

Основными нормативными документами в сфере деятельности по экологическому, технологическому и атомному надзору на территории РФ являются документы [11–13].

Оценка риска возникновения аварии по российским стандартам определяется по следующей последовательности действий [4]:

Шаг 1. Идентификация опасности и сбор сведений об объекте.

Шаг 2. Определение сценариев развития аварий — определение основных факторов, способствующих развитию аварии.

Шаг 3. Оценка частоты реализации сценариев развития аварии:

- сбор статистик отказов оборудования;
- построение деревьев отказов;
- определение частоты иницирующих событий;
- определение условий вероятности факторов, способствующих развитию аварии.

Шаг 4. Оценка последствий реализации сценариев аварии: определение параметров выброса опасных веществ (параметры интенсивности выброса, продолжительность, масса выброса);

1) оценка последствий сценариев, сопровождающихся взрывом:

- определение параметров дрейфа взрывоопасных облаков (расстояние дрейфа, размер облака, масса во взрывоопасных пределах);
- определение параметров ударной волны при воспламенении облака;

2) оценка последствий сценариев, сопровождающихся пожаром:

- определение параметров теплового излучения при реализации факельного горения (размеры пламени, интенсивность теплового излучения);
- определение параметров теплового излучения при реализации пожара пролива (размеры пожара, интенсивность теплового излучения);
- определение параметров теплового излучения при реализации аварий, сопровождающихся пожаром-вспышкой;
- определение параметров выделения токсических продуктов горения (интенсивность выделения);

3) оценка последствий сценариев, сопровождающихся токсическим поражением:

- определение параметров дрейфа токсических облаков (динамика распределения концентрации токсических веществ в атмосфере);
- определение параметров поражения продуктами горения (динамика распределения концентрации токсических веществ в атмосфере);
- определение возможного ущерба и количества погибших при реализации сценария аварии.

Шаг 5. Расчет показателей риска — построение кривых социального риска:

1) построение полей потенциального риска гибели людей:

- определение коллективного риска для различных групп персонала и населения;
- определение индивидуального риска гибели для различных групп персонала и населения;

2) построение полей потенциального риска разрушения зданий/сооружений:

- определение риска разрушения зданий/сооружений;
- определение коллективного риска для различных групп персонала и населения;
- определение индивидуального риска гибели для различных групп персонала и населения.

Шаг 6. Подготовка рекомендаций по уменьшению риска.

Сравним европейские с нашими методиками оценки риска.

Европейская система оценки риска аварий на опасных производственных объектах отличается от российской тем, что в европейских методиках оценка риска является двухуровневой (в российских методиках оценка на уровне не подразделяется).

К первому уровню анализа в европейских методиках относятся случаи пролива эталонных газов (например, аммиака). Все вероятностные характеристики для первого уровня анализа количественной оценки рассчитаны экспертами, являются по-

стоянными величинами и табличными данными. Вероятности умножаются на поправочные коэффициенты, которые, в свою очередь, также рассчитаны экспертами для всех типовых механизмов разрушения. Поправочные коэффициенты — постоянные величины, являются табличными данными.

На втором уровне анализа рассматриваются сложные процессы истечения жидкости или следствия истечения неэталонных газов, а также нетипичные механизмы разрушения, например, когда в ходе истечения газ смешивается с воздухом, грязью, осадками, другими газами, вследствие чего образуется облако нового опасного химического вещества.

Все возможные сценарии развития аварии на исследовательском реакторе сведены к двум наиболее вероятным и наиболее опасным, в то время как в российской нормативной документации представлено более шести типовых сценариев развития аварии, многие из которых повторяются с незначительными отличиями [4].

В отечественных нормативных документах оценка безопасности не разбивается на уровни. Расчеты вероятностных характеристик, в которых учитываются все аспекты возможной или произошедшей аварии, ведутся для каждого объекта индивидуально [4].

За счет таких принципиальных отличий наши количественные оценки точнее европейских, но более затратные по времени расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. API RP 581. Risk-Based Inspection Technology, Third Edition. Washington, American Petroleum Institute, 2015. Режим доступа: <http://www.iranpm.ir/wp-content/uploads/2011/08/API-581-2008.pdf>.
2. Managing LNG Risks — Containment // The international group of liquefied natural gas importers: LNG Information Paper. No. 5. Режим доступа: http://www.giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/lng_5_-_containment_new_drawings_7.3.09-aacomments-aug09.pdf.
3. API 579-1 / ASME FFS-1 2016 Fitness-For-Service. Washington, American Petroleum Institute and the American Society of Mechanical Engineers, 2016.
4. РД 03-410-01. Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов : утв. постановлением Госгортехнадзора России от 20.07.2001 № 32.
5. Benz A. Abnormal cracks led to premature decommissioning of boiler feed water exchanger — what happened and why? // Inspectioneering Journal. Asset integrity intelligence. Sept. Oct 2014. Vol. 20. Issue 5.
6. Vincente F. Mechanical Integrity Assessment of Large NGL Pressure Vessel Case Study // Inspectioneering Journal. May/ June 2009. Vol. 15. Issue 3.
7. Patel R.J. Risk Based Inspection // 3rd MENDT — Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition. 27-30 Nov 2005 Bahrain, Manam. Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/23.pdf>.
8. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде. М. : Недра, 1991. 168 с.
9. Заявка РФ 96 121 983 (13) МПК B01D 45/08. Сепаратор / Н.Н. Елин, А.В. Солодов, В.В. Масленников, А.П. Данилин, Б.В. Жуков. № 96121983/25; 13.11.1996; опубл. 20.09.1998.
10. Абалтусов В.Е., Немова Т.Н. Исследование взаимодействия высокотемпературных одно- и двухфазных потоков с элементами активной теплозащиты // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30. № 4. С. 798–802.
11. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Серия 09: Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Вып. 38. М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2014. 44 с.
12. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Серия 27: Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. Вып. 8. М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2015. 56 с.

13. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». Серия 27: Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. Вып. 11. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. 130 с.

14. Ханухов Х.М., Алипов А.В. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций // Предотвращение аварий зданий и сооружений — 2011 : сб. науч. тр. М., 2011. Режим доступа: <http://pamag.ru/src/ntoo-berk/ntoo-berk.pdf>.

15. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». Серия 09: Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Вып. 37. 2-е изд., доп. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. 126 с.

16. Добромислов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2008. 301 с.

17. SLAB View™: Emergency Release Dense Gas Model // Lakes Environmental Software. Режим доступа: <https://www.weblakes.com/products/slab>.

18. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н. и др. Экология и безопасность жизнедеятельности / под ред. Л.А. Муравья. М.: Юнити-Дана, 2000. 447 с.

19. Ханухов Х.М., Алипов А.В., Чернобров А.Р. Конструктивные способы повышения безопасности аммиачных изотермических резервуаров на основе оценки риска // Обеспечение промышленной безопасности в России: взаимная ответственность бизнеса и государства : IV Моск. межотрасл. форум (г. Москва, 9 апреля 1915 г.). М., 2015.

20. Рахманин А.И. Обеспечение безопасности резервуаров для хранения сжиженного природного газа с учетом негативных эксплуатационных факторов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 137 с.

21. Дегтярев Д.В., Лисанов М.В., Сумской С.И. и др. Количественный анализ риска при обосновании взрывостойчивости зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 6. С. 82–89.

Поступила в редакцию в сентябре 2016 г.

Принята в доработанном виде в январе 2017 г.

Одобрена для публикации в феврале 2017 г.

Об авторах: **Ковальчук Олег Александрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной и теоретической механики, директор Института фундаментального образования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, oko44@mail.ru;

Завадская Елена Петровна — аспирант кафедры строительной и теоретической механики, ассистент кафедры прикладной математики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, alenatimoff@mail.ru.

REFERENCES

1. API RP 581. *Risk-Based Inspection Technology*, Third Edition. Washington, American Petroleum Institute, 2015. Available at: <http://www.iranpm.ir/wp-content/uploads/2011/08/API-581-2008.pdf>.

2. Managing LNG Risks — Containment. *The international group of liquefied natural gas importers*: LNG Information Paper. No. 5. Available at: http://www.giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/Lng_5_-_containment_new_drawings_7.3.09-aacomments-aug09.pdf.

3. API 579-1 / ASME FFS-1 2016 *Fitness-For-Service*. Washington, American Petroleum Institute and the American Society of Mechanical Engineers, 2016.

4. RD 03-410-01. Instruksiya po provedeniyu kompleksnogo tekhnicheskogo osvidetel'stvovaniya izotermicheskikh rezervuarov szhizhennykh gazov : utverzhdeno postanovleniyem Gosgortekhnadzora Rossii ot 20.07.01 № 32 [Approved by the Decree of the State [RD 03-410-01. Instructions for the Comprehensive technical Inspection of Insulated Tanks of Liquefied Gases: Mining and Industrial Inspectorate of Russia at 20.07.01, no. 32]. (In Russian)

5. Benz A. Abnormal cracks led to premature decommissioning of boiler feed water exchanger — what happened and why? *Inspectioneering Journal. Asset integrity intelligence*, Sept. Oct 2014, vol. 20, issue 5.

6. Vincente F. Mechanical Integrity Assessment of Large NGL Pressure Vessel Case Study, *Inspectioneering Journal*. May/June 2009, vol. 15, issue 3.

7. Patel R.J. Risk Based Inspection, *3rd MENDT — Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition*. 27–30 Nov. 2005 Bahrain, Manam. Available at: <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/23.pdf>.

8. Namiot A.Yu. *Rastvorimost' gazov v vode* [Gases Solubility in Water: Reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 168 p. (In Russian)

9. RF Patent Application 96 121 983 (13) IPC B01D 45/08. *Separator* / Elin N.N.; Solodov A.V.; Maslennikov V.V.; Danilin A.P.; Zhukov B.V. No. 96121983/25; 13.11.1996; Published 09.20.1998. (In Russian)

10. Abaltusov V.Ye., Nemova T.N. Issledovaniye vzaimodeystviya vysokotemperaturnykh jedno- i dvukhfaznykh potokov s elementami aktivnoy teplozashchity [Investigation of the Interaction between High-Temperature Single- and Two-phase Flows with the Elements of Active Thermal Protection]. *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature Thermal Physics]. 1992, vol. 30, no. 4, pp. 798–802. (In Russian)

11. Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika otsenki riska avariyn na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh neftegazopererabatyvayushchey, nefte- i gazokhimicheskoy

promyshlennosti» [Safety Manual “The Methodology for the Risk Assessment of Accidents at Hazardous Facilities of the Oil and Gas Refining, Petrochemical and Gas Chemical Industries”]. Library 09: Dokumenty po bezopasnosti, nadzornoy i razreshitel'noy deyatel'nosti v khimicheskoy, neftekhimicheskoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Documents on the Safety, Supervision and Licensing in the Chemical, Petrochemical and Oil Refining Industry]. Issue 38. Moscow, ZAO «Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» Publ., 2014, 44 p. (In Russian)

12. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodicheskiye osnovy po provedeniyu analiza opasnostey i otsenki riska avari na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh»* [Safety Manual “Methodological Framework for the Hazard Analysis and Risk Assessment of Accidents at Hazardous Facilities”]. Library 27: Deklarirovaniye promyshlennoy bezopasnosti i otsenka riska [Certification of the Industrial Safety and Risk Assessment]. Issue 8. Moscow, ZAO «Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» Publ., 2015, 56 p. (In Russian)

13. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika modelirovaniya rasprostraneniya avariynykh vybrosov opasnykh veshchestv»* [Safety Manual “Methodology for Modeling the Distribution of the Accidental Emissions of Hazardous Substances”]. Library 27: Deklarirovaniye promyshlennoy bezopasnosti i otsenka riska [Certification of the Industrial Safety and Risk Assessment]. Issue 11. Moscow, ZAO «Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» Publ., 2015, 130 p. (In Russian)

14. Khanukhov Kh.M., Alipov A.V. Normativno-tehnicheskoye i organizatsionnoye obespecheniye bezopasnoy ekspluatatsii rezervuarnykh konstruksiy [Normative-technical and organizational support of the safe operation of reservoir constructions]. *Predotvrashcheniye avari y zdanii i sooruzheniy — 2011 : sbornik nauchnykh trudov* [Accident Prevention of Buildings and Facilities — 2011 : Collection of Scientific Papers]. Moscow, 2011. Available at: <http://pamag.ru/src/ntoo-berk/ntoo-berk.pdf>. (In Russian)

15. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Obshchiye pravila vzryvbezopasnosti dlya vzryvopozhharoопасnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv: Ruk-vo po bezopasnosti»* [Safety Manual “General Rules of the Explosion Safety for Explosive Chemical,

Petrochemical and Oil Refineries”]. Library 09: Dokumenty po bezopasnosti, nadzornoy i razreshitel'noy deyatel'nosti v khimicheskoy, neftekhimicheskoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Papers on Safety, Supervision and Licensing in the Chemical, Petrochemical and Oil Refining Industry]. Issue 37. Moscow, ZAO «Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» Publ., 2014, 126 p. (In Russian)

16. Dobromyslov A.N. *Diagnostika povrezhdeniy zdanii i inzhenernykh sooruzheniy* [Diagnostics of the Damage of Buildings and Engineering Construction]. Moscow, ASV Publ, 2008. 301 p. (In Russian)

17. SLAB View™: Emergency Release Dense Gas Model. Lakes Environmental Software. Available at: <https://www.weblakes.com/products/slab>.

18. Krivoshein D.A., Muravey L.A., Royeva N.N. et al. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeystel'nosti* [Ecology and Life Safety]. Moscow, Yuniti-Dana Publ., 2000. 447 p. (In Russian)

19. Khanukhov Kh.M., Alipov A.V., Chernobrov A.R. Konstruktivnyye sposoby povysheniya bezopasnosti ammiachnykh izotermicheskikh rezervuarov na osnove otsenki riska [Constructive Ways to Improve the Safety of Ammonium Isothermal Reservoirs based on Risk Assessment]. *Obespecheniye promyshlennoy bezopasnosti v Rossii: vzaimnaya otvetstvennost' biznesa i gosudarstva : IV Moskovskiy mezhotraslevoy forum (Moscow, 9 aprelya 1915 goda)* [Ensuring Industrial Safety in Russia: Mutual Responsibility of the Business and the State : IV Moscow Interdisciplinary Forum, (Moscow 9 April 1915)]. Moscow, 2015. (In Russian)

20. Rakhmanin A.I. *Obespecheniye bezopasnosti rezervuarov dlya khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza s uchetoм negativnykh ekspluatatsionnykh faktorov : dissertatsiya ... doktora tekhnicheskikh nauk* [Ensuring the Safety of the Storage Tanks for Liquefied Natural Gas taking into account Negative Operational Factors : Thesis of the candidate of technical sciences]. Moscow, 2015. 137 p. (In Russian)

21. Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Sumskey S.I. et al. Kolichestvennyy analiz riska pri obosnovanii vzryvoustoychivosti zdanii i sooruzheniy [Quantitative Risk Analysis in the Justification of the Explosion Resistance of Buildings and Structures]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2013, no. 6, pp. 82–89. (In Russian).

Received in September 2016.

Adopted in revised form in January 2017.

Approved for publication in February 2017.

About the authors: **Koval'chuk Oleg Aleksandrovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Building and Theoretical Mechanics, Director of the Institute of Fundamental Education, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337, Oko44@mail.ru;

Zavadskaya Elena Petrovna — Postgraduate Student, Department of Construction and Theoretical Mechanics, Assistant, Department of Applied Mathematics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337, alenatimoff@mail.ru.