

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 4. С. 27–37
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(4):27-37

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/SCIENTIFIC AND ANALYTICAL PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37>

Анализ методов определения коэффициента участия горючих газов и паров во взрыве при установлении категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности

Геннадий Тимофеевич Земский¹ ✉, Леонид Петрович Вогман¹,
Наталья Валентиновна Кондратюк¹, Дмитрий Александрович Корольченко²

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Многочисленные публикации на тему о категорировании помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности разделены авторами на три группы: 1) действующие источники информации (в том числе ведомственные и региональные), а также действующие ранее источники; 2) учебники и пособия по категорированию; 3) публикации, в которых находят подтверждение (опровержение) или уточнение некоторые положения, отраженные в источниках нормативного характера. Данная статья относится к третьей группе публикаций.

Цель. Рассмотрение различных методов определения коэффициента Z , выявление положительных и отрицательных сторон каждого метода, а также разработка предложений по их применению.

Задачи. Определить коэффициент участия вещества во взрыве, показать работоспособность того или иного метода его определения на конкретных примерах.

Результаты и их обсуждение. Из представленного анализа методов определения коэффициента Z участия паров ЛВЖ во взрыве следует, что он может быть установлен тремя способами:

- табличным (по максимально возможному табличному значению: для водорода $Z = 1$; для газов и аэрозолей $Z = 0,5$; для паров ЛВЖ $Z = 0,3$);
- расчетным на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения, однако при использовании расчетного метода велика вероятность ошибки, обусловленной многочисленными условиями применимости метода, возможно получение необъяснимого значения Z более 1. Кроме того, расчетный метод весьма трудоемкий. Для его применения необходимо уточнение условий, при которых он может быть использован;
- графическим (по графику зависимости Z от параметра X). Этот метод является наиболее простым и надежным. При использовании графического метода определения коэффициента Z следует принимать коэффициент избытка окислителя равным близким к единице, параметр X следует рассчитывать по формуле $X = 0,99P_{\text{н}}/C_{\text{ст}}$.

Выводы. Графический метод определения величины Z отличается простотой и надежностью. При определении параметра X используется коэффициент избытка воздуха $\phi = 1,9$, что приводит к занижению коэффициента участия паров во взрыве Z . Чтобы избежать неоправданного занижения коэффициента Z , целесообразно не учитывать коэффициент избытка воздуха или принимать его равным 0,99.

Ключевые слова: категорирование; легковоспламеняющаяся жидкость; давление насыщенных паров; стехиометрическая концентрация; взрывоопасная среда; расчетный метод определения; графический метод определения

Для цитирования: Земский Г.Т., Вогман Л.П., Кондратюк Н.В., Корольченко Д.А. Анализ методов определения коэффициента участия горючих газов и паров во взрыве при установлении категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 27–37. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37

✉ Земский Геннадий Тимофеевич, e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Analysis of methods used to identify combustible gas and vapour-related factors contributing to explosions in the context of assigning explosion and fire safety categories to premises

Gennadiy T. Zemskiy¹ ✉, Leonid P. Vogman¹, Natalya V. Kondratyuk¹, Dmitriy A. Korolchenko²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors have classified numerous publications, addressing the assignment of explosion and fire safety categories to premises, buildings and outdoor facilities, into the three groups: 1) sources of information that are in effect (including in-house and region-wide documents), sources that were in effect; 2) manuals and guidelines on category assignment; 3) publications that confirm (refute) or clarify some provisions, specified in regulatory sources. This article can be included into the third group of publications.

Goal. Analysis of different methods, used to identify the value of Z factor; identification of strengths and weaknesses of each method, development of recommendations on the application of these methods.

Objectives. The objective is to identify the substance-related factor contributing to explosions, use particular cases to demonstrate the efficiency of this or other identification method.

Results and discussion. The analysis of Z factor identification methods, describing the contribution of vapours of highly flammable liquids to an explosion, has proven that three types of procedures can be used to find the Z factor value:

- the method of tables (that uses the maximal possible tabular value of $Z = 1$; for gases and aerosols $Z = 0.5$; for vapours of highly flammable liquids $Z = 0.3$);
- the computational method based on a pattern of three-dimensional gas and vapour spreading on the premises; however, this method, if applied, may involve a high probability of errors due to numerous conditions limiting its applicability; hence, the unexplainable value of Z may exceed 1. Besides, the computational method is extremely laborious. Its application requires the clarification of conditions for its use;
- the graphical method (based on the dependency graph of Z on the X parameter). This method is the simplest and the most reliable one. When the graphical method is used to find the value of Z, the excess oxidant ratio must be taken as being equal to one, and the X parameter must be calculated according to the following formula: $X = 0.99 P_{s,v}/C_{st,c}$.

Conclusions. The graphical method, used to find the value of Z, is simple and reliable. When the X parameter is identified, the excess air ratio is used: $\phi = 1.9$, which leads to the underestimation of Z, the vapour-related factor contributing to explosions. To prevent the unreasonable underestimation of Z, the excess air ratio must be disregarded or taken as being equal to 0.99.

Keywords: category assignment; highly flammable liquid; pressure of saturated vapour; stoichiometric concentration; explosive environment; computational method; graphical method

For citation: Zemskiy G.T., Vogman L.P., Kondratyuk N.V., Korolchenko D.A. Analysis of methods used to identify combustible gas and vapour-related factors contributing to explosions in the context of assigning explosion and fire safety categories to premises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):27-37. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37(rus).

✉ Gennadiy Timofeevich Zemskiy, e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Введение

Вопросам категорирования объектов (помещений, зданий, наружных установок) посвящено немало публикаций. По своему содержанию их можно разделить на три группы: 1) нормативного и нормативно-правового характера; 2) пояснительно-пособного характера; 3) научно-аналитического характера.

Первую группу образуют действующие нормативные источники информации (в том числе

ведомственные и региональные), а также действующие ранее источники [1–9]. Вторую группу образуют учебники, пособия по категорированию, рекомендации для расчетов [10–20]. Третью группу образуют публикации, в которых находят подтверждение или опровержение или уточнение некоторых положений, отраженных в источниках нормативного или исследовательского характера¹ [21–39].

Настоящая статья претендует на отнесение ее к третьей группе публикаций.

¹ Князев П.Ю. Помещения, подлежащие категорированию по взрывопожарной и пожарной опасности // Лаборатория процессов горения и динамики пожара. URL: firecategory.ru/articles.php?id=27

При категорировании помещений по взрывопожарной опасности возникает необходимость определения коэффициента Z участия газов и паров во взрыве [1, 2]. Коэффициент Z может быть определен тремя способами: расчетом на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения; по графику зависимости Z от параметра X (некоторой величины, пропорциональной отношению давления насыщенных паров горючей жидкости к ее стехиометрической концентрации в реакции с кислородом воздуха) и табличным, т.е. быть принятым по максимально возможному табличному значению (для водорода $Z = 1$, для других газов и аэрозолей $Z = 0,5$, для паров легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) $Z = 0,3$).

Целью настоящей публикации является рассмотрение различных методов определения коэффициента Z , выявление положительных и отрицательных сторон каждого метода, а также разработка предложений по их применению. Задачи статьи состоят в том, чтобы на конкретных примерах определения коэффициента участия вещества во взрыве показать работоспособность того или иного метода его определения.

Методы определения коэффициента Z горючих паров и газов, их преимущества и недостатки

Расчетный метод определения коэффициента Z участия горючих паров и газов во взрыве

Согласно [2, 11], расчетное определение коэффициента Z является предпочтительным для следующих условий:

- газы и пары должны иметь температуру не выше температуры окружающей среды;
- образование взрывоопасной среды должно соответствовать случаю, когда действует соотношение:

$$\frac{100m}{(\rho_{г.п} V_{св})} < 0,5C_{НКПР},$$

где m — масса паров ЛВЖ;

$\rho_{г.п}$ — плотность газов, паров;

$V_{св}$ — свободный объем помещения;

$C_{НКПР}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени газа или пара (НКПР), % (об.);

- помещение должно быть в форме прямоугольного параллелепипеда с отношением длины к ширине не более пяти.

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, расчетный метод неприменим. Однако известны случаи, когда указанные условия выполняются,

а коэффициент Z получается более 1, что лишено физического смысла.

Рассмотрим на следующем примере определение коэффициента Z расчетным методом.

Имеется помещение размерами: длина 53 м, ширина 48 м, высота 8 м (площадь помещения 2544 м², свободный объем 16 281,6 м³). Максимально возможная температура в помещении 37 °С.

В помещении находится емкость вместимостью 40 л, наполненная бензином марки АИ-93 (л). Свойства жидкости: температура вспышки –36 °С, молекулярная масса 98 г/моль, брутто-формула $C_{7,024}H_{13,706}$ [11], плотность жидкости 761 кг/м³, масса жидкости 30,4 кг, плотность паров бензина, определенная по соотношению [2] 3,85 кг/м³, $C_{НКПР} = 1,06$ % (об.), давление насыщенного пара бензина P_n , рассчитанное с использованием коэффициентов уравнения Антуана: $A = 4,12311$, $B = 664,976$, $C = 221,695$ [11], равно 35,7 кПа.

Вентиляция помещения отсутствует.

Расчет проводим по формулам, рекомендованным в [2].

Проверка на применимость расчетного метода определения Z определяется исходя из следующих данных:

- температура жидкости равна температуре окружающей среды (37 °С);

$$\frac{100m}{(\rho_{г.п} V_{св})} = \frac{100 \cdot 30,4}{(3,85 \cdot 16\,281,6)} = 0,0485$$

$$0,5 \cdot C_{НКПР} = 0,5 \cdot 1,06 = 0,53, \text{ при этом } 0,0485 < 0,53;$$

- соотношение длины к ширине помещения $53/48 = 1,1 < 5$.

Следовательно, расчетный метод в данном примере определения коэффициента Z применим.

Коэффициент Z участия горючих газов и паров, не нагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ, при заданном уровне значимости $Q(C > C)$ рассчитывают по формулам [2, 11]:

- при $X_{НКПР} \leq 1/2L$ и $Y_{НКПР} \leq 1/2S$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} \rho_{г.п} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) X_{НКПР} Y_{НКПР} Z_{НКПР};$$

- при $X_{НКПР} > 1/2L$ и $Y_{НКПР} > 1/2S$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m} \rho_{г.п} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) FZ_{НКПР}.$$

Определим интенсивность испарения бензина по формуле (А.13) [2]:

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{M} \cdot P_n = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

а количество образующихся паров бензина за 1 час испарения — по формуле (А.12) [2]:

$$m_{\text{н}} = WFT = 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 3600 = 50,8 \text{ кг.}$$

Поскольку вылилось 30,4 кг жидкости, принимаем количество паров 30,4 кг.

Определим величину предэкспоненциального множителя C_0 , % (об.). При отсутствии подвижности воздушной среды для паров ЛВЖ:

$$C_0 = C_{\text{н}} \left(\frac{m \cdot 100}{C_{\text{н}} \rho_{\text{п}} V_{\text{св}}} \right)^{0,41} =$$

$$= 35,34 \left(\frac{30,4 \cdot 100}{35,34 \cdot 3,85 \cdot 17 \cdot 036} \right)^{0,41} = 2,33.$$

Концентрацию $C_{\text{н}}$ находим по формуле (Д.7) [1]:

$$C_{\text{н}} = 100 P_{\text{н}} / P_0 = \frac{100 \cdot 35,7}{101} = 35,34 \% (\text{об.}).$$

При $P_0 = 10$ кПа, $C_{\text{н}} = 0,99 P_{\text{н}}$.

$$C^* = \phi C_{\text{ст}} = 1,9 \cdot 1,94 = 3,68,$$

где ϕ — эффективный коэффициент избытка горючего, принимаемый равным 1,9.

Стехиометрическая концентрация

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta} =$$

$$= \frac{100}{(1 + 4,84 \cdot 10,45)} = 1,94.$$

Для горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, S, Si, P, F, Cl, Br, J, стехиометрическая концентрация в % (об.) определяется по формуле [26]:

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{(4,84b + 1)},$$

где $b = m_{\text{C}} + m_{\text{S}} + m_{\text{Si}} + 2,5m_{\text{P}} + 0,25(m_{\text{H}} - m_{\text{x}}) - 0,5m_{\text{O}}$ (m_{C} , m_{S} , m_{Si} , m_{P} , m_{H} , m_{O} — число атомов углерода, серы, кремния, фосфора, водорода и кислорода в молекуле горючего); m_{x} — суммарное число атомов F, Cl, Br, J в молекуле горючего.

Для горючих веществ неизвестного химического состава стехиометрическую концентрацию в реакции горения можно определить по соотношению [4]:

$$C_{\text{ст}} = \frac{3,806}{\Delta H_{\text{ст}}},$$

где 3,806 — коэффициент пропорциональности, определяемый для твердого, жидкого и газообразного горючего при стехиометрическом соотношении с воздухом, МДж;
 $\Delta H_{\text{ст}}$ — теплота сгорания горючего вещества.

Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ и время полного испарения 30,4 кг бензина T рассчитывают по формулам:

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 L \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 1,196 \cdot 52,9 \left[0,6 \cdot \ln \left(\frac{10,45 \cdot 2,16}{1,06} \right) \right]^{0,5} = 85,7 \text{ м;}$$

$$T = \frac{30,4}{3,53 \cdot 10^{-4}} \cdot 40 = 2153 \text{ с;}$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 S \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 1,196 \cdot 2565,65 \left[0,6 \cdot \ln \left(\frac{10,45 \cdot 2,16}{1,06} \right) \right]^{0,5} = 4142 \text{ м}$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_3 H \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 0,04714 \cdot 8,3 \cdot 1,35 = 0,53 \text{ м,}$$

где коэффициент K_1 принимается равным 1,1314 для горючих газов и 1,1958 — для ЛВЖ;

коэффициент K_2 , принимаемый равным 1 для горючих газов и для ЛВЖ: $K_2 = T/3600$; $K_2 = 2153/3600 = 0,6$;

коэффициент K_3 , принимаемый равным 0,0253 для горючих газов при отсутствии подвижности воздушной среды; 0,02828 — для горючих газов при подвижности воздушной среды; 0,04714 — для ЛВЖ при отсутствии подвижности воздушной среды и 0,3536 — для ЛВЖ при подвижности воздушной среды;

H — высота помещения, м;

$\delta = 10,45$ [1].

Поскольку в данном примере $X_{\text{НКПР}} > 1/2L$ и $Y_{\text{НКПР}} > 1/2S$,

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m} \rho_{\text{г.л}} \left(C_0 + \frac{C_{\text{НКПР}}}{\delta} \right) FZ_{\text{НКПР}} =$$

$$= \frac{5}{30,4} 10^{-3} \cdot 3,85 \cdot \left(2,16 + \frac{1,06}{10,45} \right) \cdot 2565,65 \cdot 0,55 = 2.$$

Полученная расчетом величина Z не соответствует принятым представлениям о величине коэффициента участия паров во взрыве Z , он должен принимать значения от 0 до 0,3.

Коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , входящие в формулу для определения Z , получены эмпирически с установленной в СП 12.13130 степенью достоверности. Так, коэффициент K_2 , который определяется как отношение времени полного испарения жидкости к величине 3600, может принимать значе-

ния меньше или больше единицы: когда жидкость испаряется более чем за 1 час, величина K_2 имеет значение более единицы; если же жидкость испаряется за время менее 1 часа, величина K_2 имеет значение менее единицы. А это, в свою очередь, зависит (при равных интенсивности испарения и площади испарения) от количества пролитой жидкости.

В частности, если количество пролитой жидкости увеличить в нашем примере в два раза, принять 80 л и разлить ее на те же 40 м², то изменится только коэффициент K_2 и Z станет равным 2,96 (при изменившихся $X_{\text{НКПР}} = 121,2$; $Y_{\text{НКПР}} = 5892$; $Z_{\text{НКПР}} = 0,75$; $K_2 = 1,2$).

Таким образом, коэффициент Z участия паров ЛВЖ во взрыве, определенный расчетным способом, оказывается зависимым от количества пролитой на одной и той же площади жидкости, что не поддается логическому объяснению. Следовательно, применение расчетного метода при вычислении коэффициента Z следует ограничить определенными условиями.

Графический метод определения коэффициента Z участия горючих паров и газов во взрыве

Рассмотрим далее метод определения коэффициента Z — графический, также предложенный в [1]. Для определения коэффициента Z , согласно [1], необходимо вычислить следующие величины, рассчитанные в примере выше: $C_{\text{н}}$, C^* и $C_{\text{ст}}$.

В рассматриваемом примере пролива 40 л бензина названные величины таковы: $P_{\text{н}} = 35,7$ кПа; $C_{\text{н}} = 35,34$ %, $C_{\text{ст}} = 1,94$; $C^* = 3,68$.

В соответствии с [1], при $C_{\text{н}} > C^*$ величина $X = 1$, а коэффициент $Z = 0,3$.

Графический метод определения коэффициента Z не учитывает влияние размеров помещения на коэффициент Z . На него оказывают влияние только свойства паров ЛВЖ.

Влияние свойств паров ЛВЖ 40 веществ на коэффициент Z участия паров во взрыве показано в таблице. В ней представлены исходные данные физико-химических свойств этих веществ¹ [27, 28] и рассчитанные для них значения $C_{\text{н}}$, C^* , X , Z .

Из таблицы следует, что вещества делятся на три группы:

- вещества, имеющие расчетное значение параметра X менее 0,4, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} < 0,83$;
- вещества, имеющие расчетное значение параметра X от 0,4 до 1, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} > 0,83 < 2,08$;
- вещества, имеющие расчетное значение параметра X более 1, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} > 2,08$.

Вещества первой группы имеют коэффициент участия во взрыве, равный 0, в эту группу входят вещества, имеющие температуру вспышки $T_{\text{в}}$ более, чем максимальная температура воздуха для данной местности. Исключение составляет изопропилбензол ($T_{\text{в}} = 37$ °C) и н-бутиловый спирт ($T_{\text{в}} = 35$ °C).

Вещества второй группы имеют коэффициент участия во взрыве выше 0 до 0,299. Возможны случаи в этой группе, когда $Z > 0$, но $T_{\text{в}}$ превышает температуру окружающей среды. В этом случае коэффициент Z участия во взрыве, используемый в формуле для расчета давления взрыва, следует принимать равным 0.

Вещества третьей группы имеют Z , равный 0,3.

Из таблицы также следует, что параметр X уменьшается с понижением температуры вспышки.

Влияние свойств паров ЛВЖ на коэффициент участия во взрыве Z

The influence of the properties of LVH vapors on the coefficient of participation in the explosion

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто-формула Molecular formula	β	$C_{\text{ст}}$, % об. $C_{\text{ст.с}}$, % vol.	$P_{\text{н}}$, кПа, при 37 °C $P_{\text{с.н}}$, кПа at 37 °C	$C_{\text{н}}$ $C_{\text{с}}$	C^*	X	Z	$T_{\text{в}}$, °C T_{pos} , °C
н-Ундекан n-Undecane	$C_{11}H_{24}$	17	1,2	0,19	0,17	2,28	0,076	0	62
н-Амиловый спирт n-Amyl alcohol	$C_5H_{12}O$	7,5	2,68	0,65	0,59	5,09	0,116	0	48
N,N-Диметилформаамид N,N-Dimethylformamide	C_3H_7ON	4,25	4,64	1,03	0,94	8,82	0,107	0	53
Декан Decane	$C_{10}H_{22}$	15,5	1,32	0,48	0,44	2,51	0,175	0	47
Уксусная кислота Acetic acid	$C_2H_4O_2$	2	9,36	3,94	3,59	17,78	0,202	0	40
Этилцеллозольв Ethyl cellosolve	$C_4H_{10}O_2$	5,5	3,62	1,42	1,29	6,88	0,188	0	40

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто- формула Molecular formula	β	$C_{ст}$ % об. $C_{st,c}$ % vol.	P_n , кПа, при 37 °C $P_{s,y}$, kPa at 37 °C	C_n C_s	C^*	X	Z	T_B , °C T_{pos} , °C
н-Бутиловый спирт n-Butyl alcohol	$C_4H_{10}O$	6	3,33	2,03	1,85	6,33	0,293	0	35
γ -Пиколин γ -Picoline	C_6H_7N	7,75	2,6	1,62	1,47	4,94	0,299	0	39
Амилацетат Amyl acetate	$C_7H_{14}O_2$	9,5	2,13	1,51	1,37	4,05	0,340	0	43
Изопропилбензол Isopropylbenzene	C_9H_{12}	12	1,69	1,23	1,12	3,21	0,349	0	37
Стирол Styrene	C_8H_8	10	2,02	1,77	1,61	3,84	0,421	0,035	30
н-Нонан n-Nonane	C_9H_{20}	14	1,45	1,25	1,14	2,76	0,414	0,03	31
о-Ксилол o-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	1,75	1,59	3,67	0,435	0,065	31
Хлорбензол Chlorobenzene	C_6H_5Cl	7	2,87	3,05	2,78	5,45	0,510	0,09	29
м-Ксилол m-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,16	1,97	3,67	0,537	0,13	28
Изобутиловый спирт Isobutyl alcohol	$C_4H_{10}O$	6	3,33	3,53	3,21	6,33	0,509	0,09	28
п-Ксилол p-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,27	2,07	3,67	0,565	0,16	26
Этилбензол Ethylbenzene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,47	2,25	3,67	0,614	0,17	20
н-Пропиловый спирт n-Propyl alcohol	C_3H_8O	4,5	4,39	5,73	5,21	8,34	0,627	0,175	23
Ксилол (смесь изомеров) Xylene (mixture of isomers)	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,75	2,50	3,67	0,684	0,215	29
Пиридин Pyridine	C_5H_5N	6,25	3,2	5,0	4,55	6,08	0,750	0,24	20
Этиловый спирт Ethyl alcohol	C_2H_6O	3	6,44	15,0	13,65	12,24	1,12	0,3	13
1,2-Дихлорэтан 1,2-Dichloroethane	$C_2H_4Cl_2$	2,5	7,63	18,1	16,47	14,50	1,14	0,3	9
н-Октан n-Octane	C_8H_{18}	12,5	1,63	3,56	3,24	3,10	1,05	0,3	14
Метиловый спирт Methyl alcohol	CH_4O	1,5	12,1	30,3	27,6	23,0	1,20	0,3	6
1,4-Диоксан 1,4-Dioxane	$C_4H_8O_2$	5	3,97	9,28	8,44	7,54	1,12	0,3	11
Изопропиловый спирт Isopropyl alcohol	C_3H_8O	4,5	4,39	12,0	10,92	8,34	1,31	0,3	14
Толуол Toluene	C_7H_8	9	2,24	6,86	6,24	4,26	1,47	0,3	7
Метилпропилкетон Methylpropyl ketone	$C_5H_{10}O$	7	2,87	9,11	8,29	5,45	1,52	0,3	6
Сероуглерод Carbon disulfide	CS_2	3	6,44	74,2	67,5	12,24	5,53	0,3	-43

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто-формула Molecular formula	β	$C_{ст}$, % об. $C_{st,с}$, % vol.	P_H , кПа, при 37 °С $P_{s,37}$, kPa at 37 °С	C_H C_s	C^*	X	Z	$T_{в*}$, °С T_{pos} , °С
Этилацетат Ethyl acetate	$C_4H_8O_2$	4	4,91	22,0	20,0	9,33	2,15	0,3	–3
2,2,4-Триметилпентан 2,2,4-Trimethylpentane	C_8H_{18}	12,5	1,63	11,4	10,4	3,10	3,35	0,3	–4
Бензол Benzene	C_6H_6	7,5	2,68	21,4	19,5	5,09	3,83	0,3	–11
Тетрагидрофуран Tetrahydrofuran	C_4H_8O	5,5	3,62	35,7	32,5	6,88	4,73	0,3	–20
Циклогексан Cyclohexane	C_6H_{12}	9	2,44	21,23	19,3	4,64	4,18	0,3	–17
Ацетон Acetone	C_3H_6O	4,5	4,39	50,03	45,5	8,34	5,47	0,3	–18
н-Гексан n-Hexane	C_6H_{14}	9,5	2,13	33,18	30,2	4,05	7,48	0,3	–23
Диэтиламин Diethylamine	$C_4H_{11}N$	6,75	2,97	51,33	46,7	5,64	8,30	0,3	–14
Метилэтилкетон Methyl ethyl ketone	C_4H_8O	5,5	3,62	167,8	152,7	6,88	22,25	0,3	–6
Амилен Amylene	C_5H_{10}	7,5	2,68	128,4	116,8	5,09	23,00	0,3	–18

Обращает на себя внимание тот факт, что в расчетах принимался коэффициент избытка воздуха $\varphi = 1,9$. Однако этот коэффициент при горении в замкнутом пространстве (например, в помещении) не может принимать такое значение. Он существенно ниже, а при открытом пожаре он выше и может достигать значений 2–5.

В условиях пожара, когда горение протекает с естественным притоком воздуха, коэффициент избытка воздуха в большинстве случаев выше единицы и колеблется в широких пределах¹.

Сопоставляя формулы $C_H = 100 \cdot P_H/P_0$ и $C^* = \varphi C_{ст}$, становится ясно, что чем меньше коэффициент избытка воздуха φ , тем больше отношение $C_H/C^* = X$.

Если принять коэффициент $\varphi = 1,1$, то таблица изменится. При уменьшении коэффициента φ область веществ, имеющих X от 0,4 до 1, смещается вверх. Например, если при $\varphi = 1,9$ н-бутиловый спирт имеет коэффициент $Z = 0$ и может рассматриваться как взрывобезопасное вещество, то при $\varphi = 1,1$ н-бутиловый спирт имеет $Z = 0,085$ и наличие паров этого вещества в помещении следует учитывать при определении категории помещения. Чтобы избежать подобных ситуаций, представляется целесообразным при определении коэффициента Z графическим способом находить величину X как отношение $C_H/C_{ст} = 0,99P_H/C_{ст}$.

Выводы

Из представленного анализа методов определения коэффициента Z участия паров ЛВЖ во взрыве следует, что он может быть установлен тремя способами:

- табличным (по максимально возможному табличному значению);
- расчетным на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения, однако при использовании расчетного метода велика вероятность ошибки, обусловленной многочисленными условиями применимости метода, возможно получение необъяснимого значения Z более 1. Кроме того, расчетный метод весьма трудоемкий. Для его применения необходимо уточнение условий, при которых он может быть использован;
- графическим, по графику зависимости Z от параметра X . Этот метод является наиболее простым и надежным.

При использовании графического метода определения коэффициента Z следует принимать коэффициент избытка окислителя равным близким к единице, параметр X следует рассчитывать по формуле $X = 0,99P_H/C_{ст}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021).
2. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
3. ОНТП 10-99. Нормы технологического проектирования для предприятий машиностроения. Определение категорий (классификация) помещений и зданий предприятий по взрывопожарной и пожарной опасности. Противопожарные требования.
4. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
5. ОНТП 24-86. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.
6. СНиП II-90-81. Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования.
7. СН 463-74. Указания по определению категории производств по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности.
8. СН 102-71. Противопожарные нормы строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест.
9. ОСТ 90 015-39. Общесоюзные нормы строительного проектирования промышленных предприятий.
10. Корольченко А.Я., Загорский Д.О. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : учеб. пос. М. : Пожнаука, 2010. 118 с.
11. Пособие по применению СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
12. Пособие по применению НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
13. Хрунов В.А., Касаткина В.И. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : метод. указ. Иваново : Ивановский ГПУ, 2016. 36 с.
14. Водиев П.П. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. Ульяновск : УВАУ ГАИ, 2009. 19 с.
15. Овчаренко А.Г., Смирнов В.В. Расчет критериев взрывопожарной и пожарной опасности производственных помещений. Бийск : АГТУ им. Ползунова И.И., 2019. 27 с.
16. Hou J., Liu Q. Theoretical models and experimental determination methods for equations of state of silicate melts: A review // *Science China Earth Sciences*. 2019. Vol. 62. Issue 5. Pp. 751–770. DOI: 10.1007/s11430-017-9325-3
17. Cui Z., Yan Y., Liu Q., Zhao X., Xu X., Liu F. et al. Accurate determination of low-dimensional materials' complex refractive index by cavity resonant method // *Optical Materials*. 2022. Vol. 131. P. 112682. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112682
18. Lang F.C., Xing Y.M., Zhao Y.R., Zhu J., Hou X.H., Zhang W.G. Experimental determination of the interface residual stresses of carbon-fiber-reinforced polymers // *Advanced Composite Materials*. 2020. Vol. 24(sup1). Pp. 33–47. DOI: 10.1080/09243046.2014.937136
19. Habib F., Tocher D.A., Press N.J., Carmal C.J. Structure determination of terpenes by the crystalline sponge method // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020. Vol. 308. P. 110548. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110548
20. Lv Y., Liang J., Wang B., Zhang X., Yuan W., Li Y., Xie J. Effect of heat and moisture transfer on the growth of mould on the inner surface of walls: A case study in Dalian of China // *Building Simulation*. 2020. Issue 13. Issue 6. Pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s12273-014-0200-9
21. Баратов А.Н. Категорирование объектов по пожаровзрывоопасности // *Итоги науки и техники. Пожарная охрана : сб. науч. тр. Т. 6. М. : ВИНТИ, 1985. С. 41–68.*
22. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А., Никонова Е.В. Совершенствование системы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2001. Т. 10. № 3. С. 25–27.
23. Земский Г.Т., Вогман Л.П., Масленников В.В., Зуйков В.А., Зенин В.А. Определение категории помещений по пожаровзрывоопасности, в которых обращаются взаймореагирующие вещества // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1993. № 4. С. 28–31.
24. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Шевчук А.П. О принципе «максимального ожидаемого воздействия» при категорировании производственных помещений по взрывопожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1992. Т. 1. № 3. С. 46–48.
25. Васюков Г.В., Корольченко А.Я., Рубцов В.В. К вопросу о категорировании помещений для хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2006. Т. 15. № 1. С. 25–29.
26. Харламенков А.С. Категорирование помещений газовых котельных по взрывопожарной и пожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. № 27.

- № 11. С. 70–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576465>
27. Вогман Л.П., Земский Г.Т., Зуиков В.А., Кондрачук Н.В., Зуиков А.В. Методологический подход к определению категорий по взрывопожарной и пожарной опасности помещений и наружных установок хранения фейерверочных изделий I–III классов опасности // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. Балашиха, 2019. С. 155–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38074288>
 28. Земский Г.Т., Зуиков В.А. О категорировании помещений с наличием летучих жидкостей // Пожарная безопасность. 2013. № 1. С. 39–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875599>
 29. Пейсахов И.Л., Лютин Ф.Б. Атлас диаграмм и номограмм по газопылевой технике. М. : Металлургия, 1974. 116 с.
 30. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. М. : ВНИИПО МЧС России, 2002. 77 с.
 31. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. М. : Пожнаука, 2004.
 32. Земский Г.Т. Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений : справочник. М. : ВНИИПО МЧС России, 2016. 971 с.
 33. Портола В.А., Луговцева Н.Ю., Торосян Е.С. Расчет процессов горения и взрыва : учеб. пос. Томск : Томского политехнического университета, 2012. 108 с.
 34. Смельков Г.И., Пехотилов В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей // Безопасность труда в промышленности. 2020. Т. 5. С. 56–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62
 35. Nikulina Y., Shulga T., Sytnik A., Toropova O. System analysis of the process of determining the room category on explosion and fire hazard // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 337. Pp. 125–139. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_11
 36. Shulga T., Nikulina Y. Decision support system for fire alarm design // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. Vol. 416. Pp. 407–416. DOI: 10.1007/978-3-030-95112-2_33
 37. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Ysokomorny V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles ignited in a high-temperature air medium // Fuel. 2022. Vol. 313. P. 123024. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.123024
 38. Okamoto K., Ichikawa T., Fujimoto J., Kashiwagi N., Nakagawa M., Hagiwara T. et al. Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 148. Pp. 893–902. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.010
 39. Wang T., Zhou Y., Luo Z., Wen H., Zhao J., Su B. et al. Flammability limit behavior of methane with the addition of gaseous fuel at various relative humidities // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 140. Pp. 178–189. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.005

REFERENCES

1. *Technical Regulations on fire safety requirements* : Federal Law No. 123-FZ of 22.07.2008 (as amended on 30.04.2021). (rus).
2. SP 12.13130.2009. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
3. ONTP 10-99. *Norms of technological design for mechanical engineering enterprises. Definition of categories (classification) of premises and buildings of enterprises for explosion and fire hazard. Fire protection requirements*. (rus).
4. NPB 105-03. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
5. ONTP 24-86. *Determination of categories of premises and buildings for explosion and fire hazard*. (rus).
6. SNiP II-90-81. *Industrial buildings of industrial enterprises. Design standards*. (rus).
7. CH 463-74. *Instructions for determining the category of production for explosive, explosion and fire hazard*. (rus).
8. CH 102-71. *Fire safety standards of construction design of industrial enterprises and populated areas*. (rus).
9. OST 90 015-39. *All-Union norms of construction design of industrial enterprises*. (rus).
10. Korolchenko A.Ya., Zagorsky D.O. *Categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard : study guide*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010; 118. (rus).
11. Manual on the use of SP 12.13130.2009. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
12. Manual on the use of NPB 105-03. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
13. Khrunov V.A., Kasatkina V.I. *Categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard : methodical instructions*. Ivanovo, Ivanovo GPU, 2016; 36. (rus).
14. Vodiev P.P. *Definition of categories of premises and buildings for explosion and fire hazard*. Ulyanovsk, UVAU GAI, 2009; 19. (rus).
15. Ovcharenko A.G., Smirnov V.V. *Calculation of criteria for explosion and fire hazard of industrial premises*. Biysk, AGTU im. Polzunova I.I., 2019; 27. (rus).
16. Hou J., Liu K. Theoretical models and experimental methods for determining the equations

- of state of silicate melts: Review. *Science China Earth Sciences*. 2019; 62(5):751-770. DOI: 10.1007/s11430-017-9325-3
17. Cui Z., Yan Y., Liu Q., Zhao X., Xu X., Liu F. et al. Precise determination of the complex refractive index of low-dimensional materials by the resonator resonance method. *Optical Materials*. 2022; 131:112682. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112682
 18. Lang F.K., Xing Y.M., Zhao Y.R., Zhu J., Hou H.H., Zhang U.G. Experimental determination of residual stresses at the interface of polymers reinforced with carbon fiber. *Composite Structures*. 2020; 24(sup1): 33-47. DOI: 10.1080/09243046.2014.937136
 19. Habib F., Tocher D.A., Press N.J., Karmal K.J. Determination of the structure of terpenes by the crystal sponge method. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020; 308:110548. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110548
 20. Lv Yu., Liang J., Wang B., Zhang H., Yuan W., Li Yu. et al. Influence of heat transfer and moisture transfer on the growth of mold on the inner surface of walls: a case study in Dalian, China. *Modeling of Buildings*. 2020; 13(6):1269-1279. DOI: 10.1007/s12273-014-0200-9
 21. Baratov A.N. Categorization of objects by fire and explosion hazard. *Results of science and technology. Fire Protection : collection of scientific papers*. Vol. 6. Moscow, VINITI, 1985; 41-68. (rus).
 22. Baratov A.N., Pchelintsev V.A., Nikonova E.V. Improvement of the system of categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(3):25-27. (rus).
 23. Zemsky G.T., Vogman L.P., Maslennikov V.V., Zuikov V.A., Zenin V.A. Determination of the category of premises by fire and explosion hazard in which mutually reacting substances are handled. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 4:28-31. (rus).
 24. Shebeko Yu.N., Korolchenko A.Ya., Shevchuk A.P. On the principle of "maximum expected impact" when categorizing industrial premises by explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):46-48. (rus).
 25. Vasyukov G.V., Korolchenko A.Ya., Rubtsov V.V. On the problem of categorization of premises for storage and technical service of gas-balloon fire automobiles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(1):25-29. (rus).
 26. Kharlamenkov A.S. Categorization of gas boiler rooms on explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):70-72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576465> (rus).
 27. Vogman L.P., Zemsky G.T., Zuikov V.A., Kondratyuk N.V., Zuikov A.V. Methodological approach to the definition of categories for explosion and fire hazard of premises and outdoor installations for the storage of fireworks of hazard classes I–III. *Actual Problems of Fire Safety : materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference*. Balashikha, 2019; 155-157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38074288> (rus).
 28. Zemsky G.T., Zuikov V.A. Classification of premises with the presence of volatile liquids. *Fire Safety*. 2013; 1:39-45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875599> (rus).
 29. Peisakhov I.L., Lyutin F.B. *Atlas of diagrams and nomograms for gas-dust technology*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974; 116. (rus).
 30. *Calculation of the main indicators of fire and explosion hazard of substances and materials : manual*. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2002; 33. (rus).
 31. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : reference*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. (rus).
 32. Zemsky G.T. *Physico-chemical and flammable properties of organic chemical compounds : reference*. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2016; 971. (rus).
 33. Portola V.A., Lugovtseva N.Yu., Torosyan E.S. *Calculation of combustion and explosion processes : study guide*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012; 108. (rus).
 34. Smelkov G.I., Pekhotikov V.A., Ryabikov A.I., Nazarov A.A. To the issue of accumulator batteries fire safety. *Occupational Safety in Industry*. 2020; 5:56-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62 (rus).
 35. Nikulina Yu., Shulga T., Sytnik A., Toropova O. System analysis of the process of determining the category of premises for explosion and fire hazard. *Research in the Field of Systems, Decision-Making and Management*. 2021; 337:125-139. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_11
 36. Shulga T., Nikulina Yu. Decision support system in the design of fire alarm systems. *Research in the Field of Systems, Decision-Making and Management*. 2022; 416:407-416. DOI: 10.1007/978-3-030-95112-2_33
 37. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Vysokogorny V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles igniting in a high-temperature air environment. *Fuel*. 2022; 313:123024. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.123024
 38. Okamoto K., Ichikawa T., Fujimoto J., Kashiwagi N., Nakagawa M., Hagiwara T. et al. Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 148:893-902. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.010
 39. Wang T., Zhou Yu., Luo Z., Wen H., Zhao J., Su B. et al. Behavior of the flammability limit of methane with the addition of gaseous fuel at different relative humidity. *Technological Safety and Environmental Protection*. 2020; 140:178-189. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.005

Поступила 27.06.2022, после доработки 20.07.2022;

принята к публикации 29.07.2022

Received June 27, 2022; Received in revised form July 20, 2022;

Accepted July 29, 2022

Информация об авторах

ЗЕМСКИЙ Геннадий Тимофеевич, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 586840; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

ВОГМАН Леонид Петрович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 561474; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

КОНДРАТЮК Наталья Валентиновна, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1126914; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Gennadiy T. ZEMSKIY, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 586840; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 561474; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Natalya V. KONDRATYUK, Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1126914; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.