

Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций

© В.В. Роечко¹, Т.И. Чистяков², Д.В. Тараканов³, Р.В. Халиков¹ ✉

- ¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)
- ² Вологодский учебный центр федеральной противопожарной службы (Россия, 347360, г. Вологодск, 8-я Заводская ул., 7)
- ³ Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 153040, г. Иваново, ул. Строителей, 33)

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных проблем пожаротушения объектов газокompрессорных станций (ГКС) являются пожары в замкнутых пространствах, в которых могут находиться электроустановки под напряжением. Предложено использовать для тушения данных пожаров струи температурно-активированной воды с добавлением солей, ингибирующих горение. Для исключения возможности поражения личного состава подразделений пожарной охраны электрическим током необходимо провести оценку электропроводимости данных струй.

Материалы и методика. В экспериментальном исследовании основным электроизмерительным прибором является цифровой мегаомметр постоянного тока М4122U, подключаемый для съема показаний и управляемый с помощью ноутбука. Измерение расхода производилось измерительным комплексом ИТ 2518 с первичным преобразователем расхода турбинного типа ТДР14-2-3. Электромагнитная обработка воды выполнялась преобразователем жесткости «Термит Т-35».

Теоретические основы. Измерение токов утечки по струям температурно-активированной воды, подаваемым с помощью пожарных стволов автомобиля пожарного многоцелевого, и предельно допустимые расстояния до электроустановки были определены экспериментально-аналитическим методом с использованием опытно-экспериментального стенда.

Результаты и обсуждения. Усредненные значения измеряемого сопротивления для струи температурно-активированной воды, полученной из дальнобойного ствола, в контрольных точках не выходят из коридора достоверности с вероятностью 0,95, а значит, не приводят к существенному изменению полного сопротивления постоянному току. Дозирование в недогретую воду ингибирующей соли приводит к уменьшению сопротивления струй температурно-активированной воды не более чем на 2...3 % по сравнению с недогретой водой. Обработка преобразователем жесткости «Термит Т-35» дозированной в недогретую воду ингибирующей соли не приводит к существенному изменению сопротивления струй температурно-активированной воды.

Выводы. Теоретически и экспериментально доказано, что дозирование ингибирующих солей в недогретую воду, а также применение электромагнитной обработки маломощными преобразователями жесткости не оказывает существенного влияния на электропроводимость струй температурно-активированной воды по сравнению со струями без ингибирующих примесей. Поверхностное тушение электроустановок струями температурно-активированной воды с дозированием ингибирующих горение солей, а также создание огнетушащей концентрации в замкнутых объемах помещений газокompрессорных станций электробезопасно для участников тушения.

Ключевые слова: электробезопасность; ингибиторы горения; объемное пожаротушение; пожары класса Е; электромагнитная обработка; экспериментально-аналитический метод; опытно-экспериментальный стенд

Благодарности. Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 15204ГУ/2020 от 5 июня 2020 г.

Для цитирования: Роечко В.В., Чистяков Т.И., Тараканов Д.В., Халиков Р.В. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 64–74. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.64-74

✉ Халиков Ринат Валерьевич, e-mail: vokilah@rambler.ru

Assessment of the electrical conductivity of thermally activated water jets containing injections of inhibiting salt used to extinguish electrical equipment at gas compressor stations

© Vladimir V. Roenko¹, Timur I. Chistyakov², Denis V. Tarakanov³, Rinat V. Khalikov¹ ✉

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

² Volgodonsk Training Center of State Fire Service (8-ya Zavodskaya St., 7, Volgodonsk, 347360, Russian Federation)

³ Ivanovo Fire Rescue of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Stroiteley St., 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. One of the main problems of fire extinguishing at gas compressor stations is fires in confined spaces where electrical installations can be under voltage. To extinguish these fires, the co-authors propose to use jets of thermally activated water containing salts that inhibit burning. It is necessary to assess the electrical conductivity of water jets to prevent the exposure of fire-fighting units to electrical injuries.

Materials and methods. In the experimental study, the principal electricity measuring instrument is digital dc megaohmmeter M4122U, which takes readings if operated from a laptop. The flow rate was measured using IT 2518 measurement complex and TDR14–2–3 primary flow converter of the turbine type. Termit T-35 hardness converter performed electromagnetic water treatment.

Theoretical fundamentals. Measurements of leakage currents in jets of thermally activated water, fed through fire nozzles mounted onto a multi-purpose fire truck, were taken, and the maximum permissible distance to an electrical installation was determined experimentally and analytically using an experimental stand.

Results and discussions. Averaged values of resistance of a jet of thermally activated water fed from a long-range nozzle at control points do not leave the confidence corridor with a probability of 0.95, which means that they do not cause a significant change in dc resistance. Inhibiting salt, injected into the water, reduces the resistance of jets of thermally activated water by no more than 2–3 % compared to under-heated water. The treatment of the inhibiting salt, injected into the under-heated water, using Termit T-35 hardness converter, does not significantly change the resistance of thermally activated water jets.

Conclusions. It is theoretically and experimentally proved that the injection of inhibiting salts into the under-heated water, as well as the electromagnetic treatment of water using low-power stiffness converters, do not significantly affect the electrical conductivity of jets of thermally activated water if compared to jets that contain no inhibiting admixtures. The extinguishing of surfaces of electrical installations using jets of thermally activated water containing flame inhibiting injections of salts, as well as the development of an inerting concentration in confined spaces of gas compressor stations is electrically safe for any person engaged in fire extinguishing.

Keywords: electrical safety; flame inhibitors; volumetric fire-fighting; class E fires; electromagnetic treatment; experimental and analytical method; pilot experiment stand

Acknowledgments. The study enjoys support from the Innovation Promotion Fund pursuant to Agreement No. 15204GU/2020 of June 05, 2020.

For citation: Roenko V.V., Chistyakov T.I., Tarakanov D.V., Khalikov R.V. Assessment of the electrical conductivity of thermally activated water jets containing injections of inhibiting salt used to extinguish electrical equipment at gas compressor stations. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):64-74. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.64-74 (rus).

✉ Rinat Valeryevich Khalikov, e-mail: vokilah@rambler.ru

Введение и актуальность темы исследования

Газодобывающая отрасль в совокупности с газотранспортной системой являются важнейшими частями экономики Российской Федерации. Экспорт природного газа — существенная статья доходов бюджета страны. Обеспечение бесперебойных поставок энергоносителей потребителям зависит от слаженной и безаварийной работы предприятий газовой отрасли. Для бесперебойного газоснабжения потребителей на территории Российской Феде-

рации эксплуатируются более 290 газокompрессорных станций (ГКС). По данным статистики [1–3], в год на ГКС случается от 15 до 18 аварий, сопровождающихся пожарами. Более 70 % всех пожаров происходит в замкнутых объемах сооружений ГКС.

Подразделения пожарной охраны, прибывшие на тушение таких пожаров, сталкиваются с опасностью поражения электрическим током от работающего электрооборудования. Выполнение требований электробезопасности и отключение всех источников электроснабжения требуют дополни-

тельного времени, за которое пожар получает развитие, а ущерб возрастает. Особенностью обеспечения электроэнергией ГКС, усложняющей организацию безопасного тушения электроустановок (ЭУ), является их принадлежность к объектам I категории электроснабжения, на которых предусмотрено два независимых источника электропитания. В качестве первого ввода питания используется внешняя линия электропередач, а второго — аварийная дизельная электростанция (ДЭС). Как показывают практика и анализ статистики [1–4], отключение внешней линии электропередач не предотвращает возникновения опасности поражения электрическим током. Это связано с тем, что в 60 % случаев автоматика управления воспринимает нарушение в электроснабжении ГКС во время пожара, как сигнал к включению ДЭС, поэтому создаются условия, когда необходимо производить тушение электроустановок, находящихся под напряжением.

Эффективность объемного тушения пожаров существующими средствами в замкнутых объемах помещений и сооружений ГКС составляет не более 57 % [5]. По этой причине предпочтение необходимо отдавать техническим средствам и веществам объемного тушения. На рис. 1 представлена диаграмма зависимости величины защищаемого объема помещения от вида огнетушащего вещества (ОТВ). Эффект объемного тушения, при использовании ОТВ, представленного на диаграмме (см. рис. 1), достигается несколькими способами: 1) вытеснение кис-

лорода и уменьшение его объемной концентрации в воздухе; 2) охлаждение зоны горения; 3) изоляция топлива от окислителя.

Из визуального анализа диаграммы на рис. 1 видно, что наибольший защищаемый объем у температурно-активированной воды (ТАВ) [6]. Усилить огнетушащую способность ТАВ можно путем дозирования растворов ингибиторов горения в магистральную рукавную линию для подачи недогретой до температуры кипения при данном избыточном давлении воды (далее — недогретая вода). Применение таких ингибиторов позволит реализовать способ тушения, основанный на торможении экзотермической окислительно-восстановительной реакции горения [7–11]. Кроме того, в работах [12–15] приводится обоснование использования электромагнитной обработки водного раствора ингибитора для повышения эффективности объемного тушения.

В исследованиях [16–18] было установлено, что струи ТАВ имеют низкую электропроводимость. Поверхностное тушение пожаров класса Е струями ТАВ безопасно и не ведет к поражению электрическим током. Объемное тушение ТАВ в [16] не рассматривалось, но логично предположить, что реализация такого вида тушения на ГКС будет осуществляться с помощью подачи струй ТАВ через отверстия в стенах и перекрытиях горящих помещений с помощью стволов автомобиля пожарного многоцелевого (АПМ). Таким образом, актуальными являются исследования электропроводимости

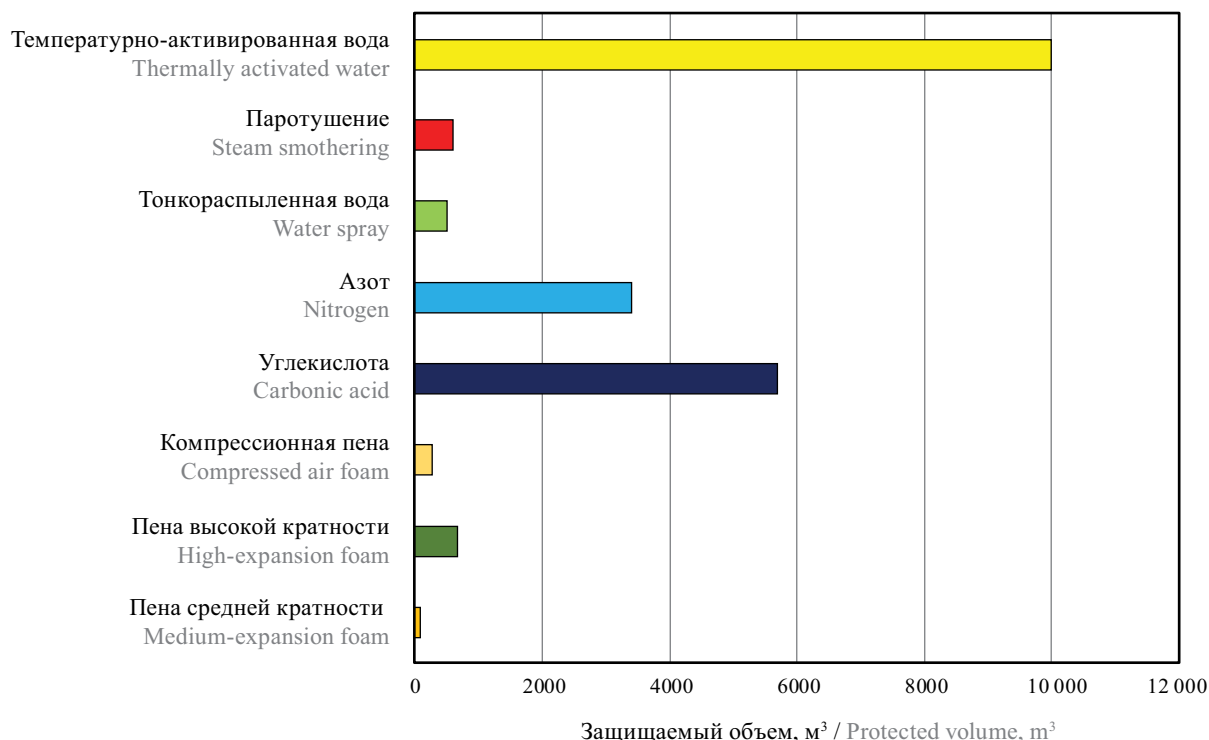


Рис. 1. Зависимость величины защищаемого объема от вида огнетушащего вещества [5]

Fig. 1. Dependence of the area to be protected on the type of an extinguishing agent [5]

струй ТАВ с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций. Для обеспечения электробезопасности участников тушения электрооборудования ГКС необходимо оценить, насколько изменяется электропроводимость струй ТАВ с дозированием ингибиторов и без них.

Теоретическое описание параметров электропроводимости струй температурно-активированной воды

В работах [16–18] струя ТАВ классифицируется как гетерогенный двухфазный поток с поли-

дисперсной водокапельной и монодисперсионной паровой фазами. В [16] установлено, что при тушении ЭУ переменного тока частотой 50 Гц, функционирующей под напряжением, струя ТАВ является *электроперколяционной системой*, т.е. такой системой, которая представляет непроводящую пространственную сетку с проводящими включениями. Проводящими включениями выступают паровая и капельная фазы. Следовательно, удельная эффективная электропроводимость струй ТАВ складывается из удельной электропроводимости паровой и капельной фаз, нормированных к единице объема:

$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \sigma_{\text{п}} \frac{\sigma_{\text{в}}(1 + 2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) + 2\sigma_{\text{п}}(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{в}} + (2 + C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — удельная проводимость капель воды полидисперсной фазы струи ТАВ, См/м;

$\sigma_{\text{п}}$ — удельная проводимость монодисперсионной паровой фазы струи ТАВ, См/м;

$C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$ — нормированная к единице объемная концентрация полидисперсной фазы, зависящая от длины $l_{\text{полн}}$ струи ТАВ.

Формулу (1) можно преобразовать, учитывая, что струя ТАВ представляет собой усеченный конус, а удельная электрическая проводимость является обратной величиной эффективного удельного сопротивления:

$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \frac{l_{\text{полн}} \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{R(l_{\text{полн}}) \pi y_1 (l_{\text{полн}} + y_1 \operatorname{ctg}(\alpha/2))}, \quad (2)$$

где $R(l_{\text{полн}})$ — сопротивление постоянному току струи ТАВ, зависящее от длины струи, Ом;

$l_{\text{полн}}$ — длина струи ТАВ, м;

α — угол раскрытия струи ТАВ, рад;

y_1 — радиус среза сопла ствола, м.

Совместное рассмотрение формул (1) и (2) показывает прямую зависимость объемной концентрации $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$ от сопротивления струи ТАВ постоянному току $R(l_{\text{полн}})$. Токи утечки по струям ТАВ, подаваемым с помощью пожарных стволов АПМ, и предельно допустимые расстояния до ЭУ были определены экспериментально-аналитическим методом, разработанным в [16].

Экспериментальное исследование струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли

В экспериментально-аналитическом методе ключевое значение имеет объемная концентрация $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$ полидисперсной (капельной) фазы, которая была найдена косвенным путем по массиву значений сопротивлений $R(l_{\text{полн}})$, полученному с помощью опытно-экспериментального стенда, изображенного на рис. 2.



Рис. 2. Проведение измерений на опытно-экспериментальном стенде массива сопротивлений постоянному току при подаче струи температурно-активированной воды из дальнобойного пожарного ствола

Fig. 2. Measurements are being taken at a pilot experiment stand designated for measuring dc resistances arising in the process of feeding a thermally activated water jet through a long-range fire hose nozzle

Анализ выражения (1) показывает, что при известных значениях объемной концентрации $C_v(l_{\text{полн}})$ и удельной проводимости пара $\sigma_{\text{п}}$ удельная эффективная электропроводность $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ будет изменяться в зависимости от значения $\sigma_{\text{в}}$ — удельной проводимости капель воды в струе ТАВ. Значение удельной проводимости $\sigma_{\text{в}}$ может меняться от минимальных значений $\sigma_{\text{в.мин}}$, соответствующих дистиллированной воде, лишенной примесей, до максимальных значений $\sigma_{\text{в.мах}}$ в воде, насыщенной ионами растворов электролитов. При помощи формулы (1) оценим девиацию $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ в зависимости от изменения $\sigma_{\text{в}}$ в интервале от $\sigma_{\text{в.мин}} = 0,0005 \text{ См/м}$ до $\sigma_{\text{в.мах}} = 100,0 \text{ См/м}$. При этом учтем, что значения из справочной литературы для удельной электрической проводимости пара — $\sigma_{\text{п}} = 0,5 \text{ нСм/м}$, а значения объемной концентрации $C_v(l_{\text{полн}})$ возьмем из [11], определив его из зависимости, представленной на рис. 3 для дальнобойного ствола.

При оценке девиации удельной эффективной проводимости струй ТАВ $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ учтем, что экспериментальные исследования проводились на территории ФАУ ДПО Волгодонский учебный центр ФПС, где использовалась вода из пожарного гидранта, которая по данным кондуктометрии обладает удельной электрической проводимостью $\sigma_{\text{в}} = 0,0312 \text{ См/м}$. Расчеты удельной эффективной проводимости струй ТАВ $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ были проведены для ствола дальнобойного, с расходом нагретой воды 1 л/с, а результаты представлены в табл. 1.

Расход других пожарных стволов АПМ составляет 0,5 л/с, а создаваемая ими объемная концентрация капель воды в струе ТАВ меньше, чем у дальнобойного ствола АПМ (см. рис. 3). Согласно выражениям (1) и (2), чем больше объемная концентрация $C_v(l_{\text{полн}})$, тем меньше сопротивление постоянному току $R(l_{\text{полн}})$ струи ТАВ, поэтому выбор для исследования дальнобойного ствола АПМ не слу-

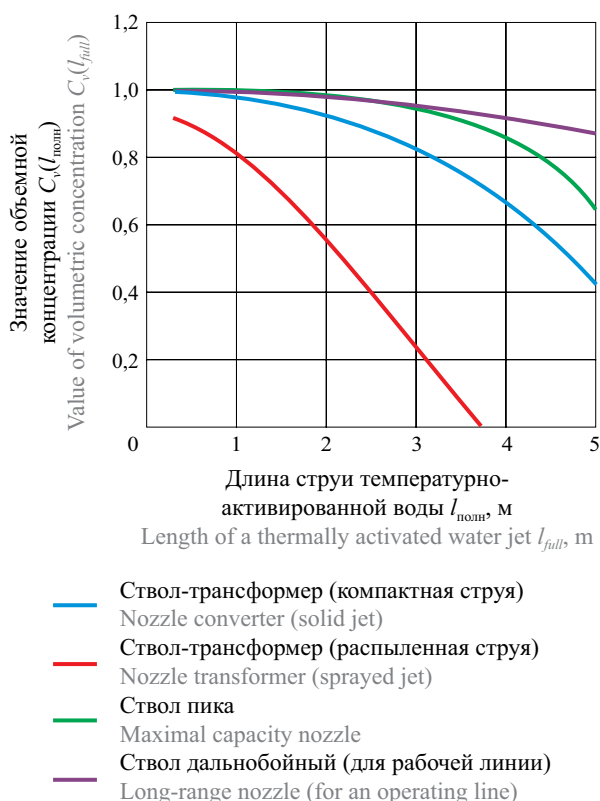


Рис. 3. График объемной концентрации $C_v(l_{\text{полн}})$ струй температурно-активированной воды для различных типов пожарных стволов автомобиля пожарного многоцелевого

Fig. 3. The diagram illustrating $C_v(l_{\text{full}})$, the volumetric concentration of thermally activated water jets for various types of fire hose nozzles mounted onto a multi-purpose fire truck

чаен, а основан на опасении, что применение именно этого пожарного ствола при тушении пожаров класса Е будет представлять наибольшую потенциальную опасность поражения электрическим током для личного состава.

Таблица 1. Результаты расчетов удельной эффективной проводимости струй ТАВ для ствола дальнобойного

Table 1. Results of calculations of specific effective conductivity of TAV jets for a long-range nozzle

Длина струи температурно-активированной воды $l_{\text{полн}}$, м Length of a thermally activated water jet, l_{full} , m	Объемная концентрация $C_v(l_{\text{полн}})$ Volumetric concentration $C_v(l_{\text{full}})$	Удельная эффективная проводимость $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ струй температурно-активированной воды, нСм/м Specific effective conductivity $\sigma_{\text{eff}}(l_{\text{full}})$ of thermally activated water jets, ncm/m		
		$\sigma_{\text{в.мин}} = 0,0005 \text{ См/м}$ $\sigma_{\text{в.мин}} = 0.0005 \text{ См/м}$	$\sigma_{\text{в}} = 0,0312 \text{ См/м}$ $\sigma_{\text{в}} = 0.0312 \text{ См/м}$	$\sigma_{\text{в.мах}} = 100,0 \text{ См/м}$ $\sigma_{\text{в.мах}} = 100.0 \text{ См/м}$
0,3	0,985420127	101,8606999	101,881222	101,8815562
1,0	0,981353851	79,43286711	79,44536317	79,44556666
2,0	0,968918226	47,25528123	47,25972171	47,25979401
3,0	0,948486238	28,11682416	28,1184067	28,11843247
4,0	0,91622916	16,90540467	16,90598277	16,90599218
5,0	0,866852157	10,26545248	10,26566899	10,26567251

Анализ полученных значений из табл. 1 показывает, что при широком диапазоне изменения удельной проводимости каплей воды полидисперсной фазы, изменения удельной эффективной проводимости струй ТАВ не превышают долей процента, так как затрагивают значения во 2–5 знаке после запятой.

Таким образом, при проведении экспериментального исследования струй ТАВ с дозированием ингибирующих солей, можно предполагать незначительное (не более 2...3 %) увеличение проводимости струй по сравнению с ТАВ без ионообразующих примесей. Если это предположение подтвердится экспериментально для дальнобойного ствола с наибольшим расходом неогретой воды и наименьшим электрическим сопротивлением струи ТАВ, то, экстраполируя полученные результаты на другие пожарные стволы АПМ (ствол-трансформер, ствол-пика), можно утверждать, что тушение ими будет более безопасно.

Экспериментальные исследования [19, 20] показывают высокую эффективность использования солей калия в качестве водорастворимых ингибиторов горения, поэтому дозируемой ингибирующей солью был выбран тригидрат гексацианоферрата (II) калия $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ (далее — гексацианоферрат (II) калия). Параметры растворимости гексацианоферрата (II) калия в воде представлены на рис. 4.

Этот ингибитор горения был использован в 25 % концентрации при проведении испытаний на опытно-экспериментальном стенде (см. рис. 2) с применением экспериментально-аналитического

метода [16] обработки массива сопротивлений постоянного тока для получения значений переменного тока утечки по струе ТАВ. Для приготовления 25 % раствора неогретой воды с дозированием желтой кровяной соли был использован агрегат электронасосный дозировочный одноплунжерный, изображенный на рис. 5, а. Для электромагнитной обработки раствора был использован преобразователь жесткости «Термит Т-35», изображенный на рис. 5, б.

Испытания проводились при температуре окружающей среды 23 °С и скорости ветра 1,0...1,5 м/с. Температура неогретой воды составляла 175 °С при расходе на дальнобойном стволе — 1 л/с и избыточном давлении перед стволом — 1,5 МПа.

Сбор экспериментальных данных производился в трех контрольных точках длины струи: 1) $l_{\text{полн.1}} = 0,3$ м; 2) $l_{\text{полн.2}} = 2,0$ м; 3) $l_{\text{полн.3}} = 4,0$ м.

Расстояние от держателя испытываемого ствола до металлического экрана составляло 6,0 м.

Целью испытаний была оценка электропроводимости струй ТАВ при их получении из дальнобойного ствола АПМ с использованием огнетушащей среды:

- 1) неогретая вода (для сравнения полученных результатов с данными из работы [11]);
- 2) неогретая вода с дозированием ингибирующего солевого раствора;
- 3) неогретая вода с дозированием ингибирующего солевого раствора, подвергнутая обработке преобразователем жесткости «Термит Т-35».

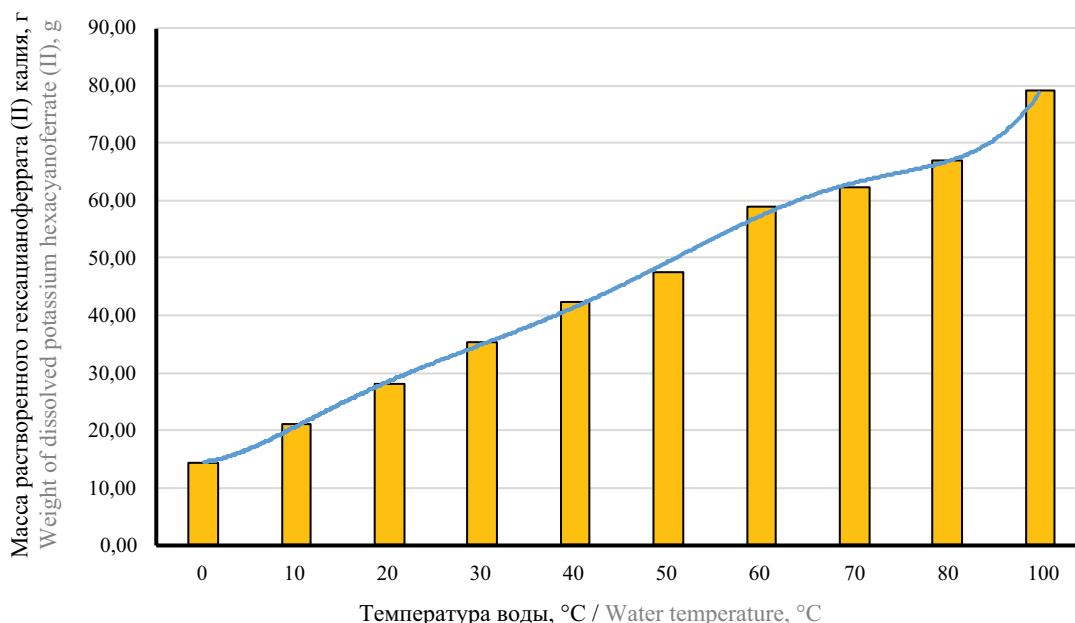


Рис. 4. Растворимость гексацианоферрата (II) калия в воде в зависимости от ее температуры

Fig. 4. Solubility of potassium hexacyanoferrate (II) in the water depending on its temperature



a



b

Рис. 5. Подключение дополнительных систем в магистральную рукавную линию для подачи недогретой воды к стволу дальнобойному: *a* — агрегат электронасосный дозировочный одноплунжерный; *b* — преобразователь жесткости «Термит Т-35»

Fig. 5. Connection of additional systems to the main hose line needed to feed under-heated water to the long-range nozzle: *a* — single-plunger electrical pump; *b* — Termit T-35 hardness converter

Результаты экспериментального исследования и обсуждение

Полученные экспериментальные данные для струй ТАВ с дозированием желтой кровяной соли сравнивались с данными из диссертации [18] для струй ТАВ без ионизирующих примесей. Результаты сравнения усредненных сопротивлений $R_{изм}$, измеренных на опытно-экспериментальном стенде, представлены на рис. 6.

Сопротивление струи ТАВ постоянному току $R(l_{полн})$ связано с усредненным значением сопротивления $R_{изм}$ через выражение:

$$\begin{cases} R(l_{полн}) = 2 \left(R_{max} - \sqrt{R_{max} (R_{max} - R_{изм})} \right) \\ \text{при } R(l_{полн}) \leq 2R_{max} \\ R(l_{полн}) = 2 \left(R_{max} + \sqrt{R_{max} (R_{max} - R_{изм})} \right) \\ \text{при } R(l_{полн}) > 2R_{max} \end{cases}, \quad (3)$$

где R_{max} — максимальное значение усредненного измеренного сопротивления в массиве $R_{изм}$, ГОм.

Для повышения точности измерения величины $R_{изм}$, а также нейтрализации влияния постоянной составляющей и ее флуктуаций, образующихся

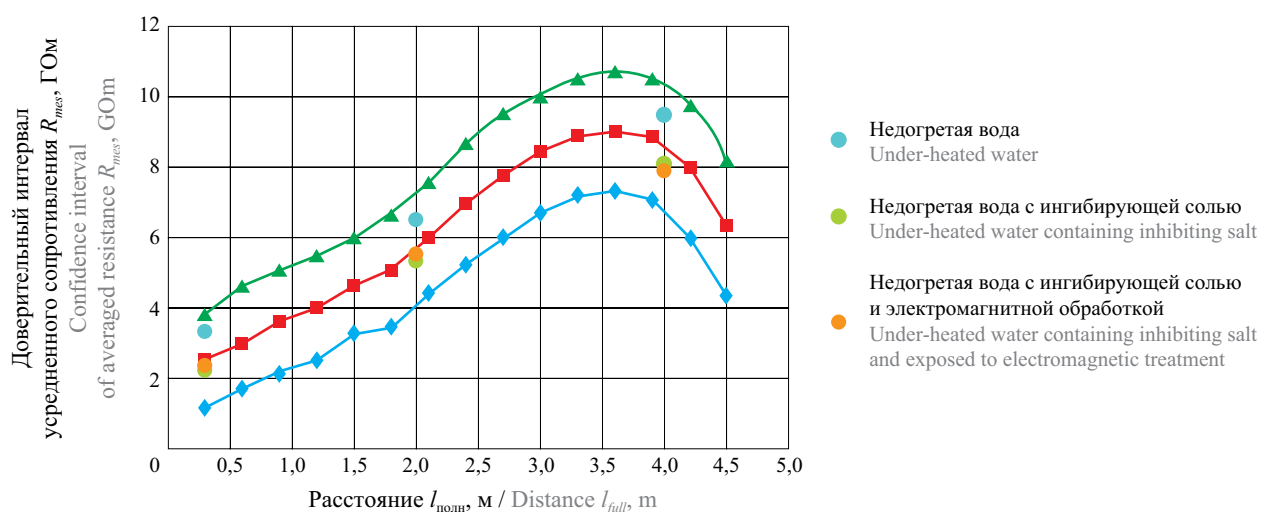


Рис. 6. Сравнение усредненных значений сопротивлений $R_{изм}$, полученных при испытаниях дальнобойного ствола

Fig. 6. Comparison of averaged values of resistances R_{mes} , obtained in the course of testing a long-range nozzle

при переносе отрицательного заряда каплями струи ТАВ, было проведено n измерений сопротивления струи $R_{изм.i}$ при верхнем положении переключателя и k измерений сопротивления струи $R_{изм.j}$ при нижнем положении переключателя полярности щупов мегаомметра опытно-экспериментального стенда [18] (см. рис. 1) при каждом увеличении расстояния на величину $\Delta l_{полн}$, а полученные данные усреднялись по количеству измерений:

$$R_{изм} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{изм.i} + \sum_{j=1}^k R_{изм.j}}{n + k}. \quad (4)$$

Анализ полученных экспериментальных данных показал:

1) результаты испытаний струи ТАВ, полученной из недогретой воды без ионизирующих примесей, с большой степенью достоверности коррелируются с предыдущими измерениями, полученными при проведении экспериментального исследования в работе [11];

2) усредненные значения сопротивлений $R_{изм}$ в формуле (4) для струи ТАВ, полученной из дальноточного ствола АПМ, в контрольных точках не выходят из коридора достоверности с вероятностью 0,95, а значит, не приводят к существенному изменению сопротивления $R(l_{полн})$ постоянному току в формуле (3);

3) дозирование в недогретую воду ингибирующей соли приводит к уменьшению сопротивления струй ТАВ не более чем на 2...3 % по сравнению

с недогретой водой без ионизирующих примесей, как и было предсказано априори (см. табл. 1);

4) обработка дозированной в недогретую воду ингибирующей соли преобразователем жесткости «Термит Т-35» не приводит к существенному изменению сопротивления струй ТАВ.

Выводы

Теоретически и экспериментально доказано, что дозирование ингибирующих солей в недогретую воду, а также применение электромагнитной обработки маломощными преобразователями жесткости не оказывают существенного влияния на электропроводимость струй ТАВ при их получении из пожарных стволов АПМ по сравнению со струями без ионизирующих примесей. На этом основании можно утверждать, что поверхностное тушение электрооборудования и ЭУ струями ТАВ с дозированием солевых ингибиторов и создание огнетушащей концентрации в замкнутых объемах помещений ГКС с помощью стволов АПМ через отверстия в стенах и перекрытиях электробезопасно для участников тушения. При тушении пожаров класса Е струями ТАВ с ингибирующими свойствами должны применяться рекомендации из диссертации [18].

В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть аспект эффективности объемного пожаротушения ТАВ с дозированием солевых ингибиторов при использовании электромагнитной обработки с помощью преобразователей жесткости большой мощности при тушении зданий и сооружений ГКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году : ст. сб. М. : ВНИИПО, 2019. 125 с.
2. Быков А.И. Методика оценки массы природного газа, участвующего в образовании огненного факела при разрыве магистрального газопровода // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 9. С. 48–54. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.48-54
3. Warzyńska U., Kollek W. Modelling of pressure pulsation in gas compressor station // Engineering Mechanics 2018. Czech Republic. May 14–17. 2018. Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2018. DOI: 10.21495/91-8-913
4. Тагиев Р.М. Принципы оптимизации систем пожарной безопасности объектов ОАО «ГАЗПРОМ» // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2006. Т. 15. № 4. С. 70–73.
5. Роевко В.В., Халиков Р.В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газодвигательных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 30–35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35
6. Роевко В.В., Храмов С.П., Сегаль М.Д., Краснов С.М. Объемный способ пожаротушения кабельных сооружений температурно-активированной водой // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. № 3. С. 40–50. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28399867> (дата обращения 01.06.2019).
7. Азатян В.В. Цепные реакции в процессах горения, взрыва и детонации газов : монография. Черноголовка, 2017. 431 с.
8. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation : with 14 tables. Einheitssacht : Technische Verbrennung, 2018. 15 p.

9. Fomin P.A., Jenq-Renn Chen. Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas // *Combustion Science and Technology*. 2009. Vol. 181. No. 8. Pp. 1038–1064. DOI: 10.1080/00102200902908535
10. Fomin P.A., Mitropetros K.S., Hieronymus H. Modeling of detonation processes in chemically active bubble systems at normal and elevated initial pressures // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003. Vol. 16. No. 4. Pp. 323–331. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00018-4
11. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type // Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. 2019. 21 p. URL: <https://www.nist.gov/publications/suppression-effectiveness-aerosols-effect-size-and-flame-type>
12. Халиков Р.В. Электрохимический подход к объемному тушению пожаров газокomppressorных станций // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли : мат. II Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 01 января – 31 декабря 2019 г. Уфа, 2019. С. 23–28.
13. Amor H.B., Elaoud A., Salah N.B., Elmoueddeb K. Effect of magnetic treatment on surface tension and water evaporation // *International Journal of Advance Industrial Engineering*. 2017. Vol. 5. No. 3. Pp. 119–124. DOI: 10.14741/Ijae/5.3.4
14. Redouane Mghaiouini, Aniss Elaoud, Toufik Garmim, Belghiti M.E., Valette Eric, Charles Henri Faure et al. The electromagnetic memory of water at kinetic condition // *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 11. DOI: 10.14741/ijcet/v.10.1.3
15. Liu H., Wang F. Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14. No. 9. P. e0222003. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
16. Чистяков Т.И. Влияние геометрических параметров струй температурно-активированной воды на комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2017. № 2. С. 12–21. DOI: 10.25257/FE.2017.2.12-21
17. Чистяков Т.И. Влияние электроперколяционных параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2018. № 1. С. 12–21. DOI: 10.25257/FE.2018.1.63-71
18. Чистяков Т.И. Применение температурно-активированной воды при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики : дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. 277 с.
19. Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Шварцберг В.М., Куценогий К.П., Марков В.И. Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей для тушения различных типов пожаров // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2012. № 3. С. 92–101. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17980207>
20. Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Шварцберг В.М., Якимов С.А., Князьков Д.А. и др. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлосодержащих соединений и твердотопливных газогенерирующих составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42. № 6. С. 64–73.

REFERENCES

1. *Fires and fire safety in 2018 : statistical collection*. Moscow, VNIPO, 2019; 125. (rus).
2. Bykov A.I. Method of estimating of the natural gas mass involved in the formation of a fiery torch at break of the main pipeline. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(9):48-54. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.48-54 (rus).
3. Warzyńska U., Kollek W. Modelling of pressure pulsation in gas compressor station. *Engineering Mechanics 2018. Czech Republic. May 14–17. 2018*. Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2018. DOI: 10.21495/91-8-913
4. Tagiev R.M. Principles of optimization of fire safety systems of objects of JSC “GAZPROM”. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(4):70-73. (rus).
5. Roenko V.V., Khalikov R.V. Fire and explosion safety in closed spaces of objects of gas compressor stations. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2020. 1:30-35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35 (rus).

6. Roenko V.V., Khrantsov S.P., Segal M.D., Krasnov S.M. Total flooding of cable structures with temperature activated water. *Problems of security and emergency situations*. 2017; 3: 40-50. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28399867> (accessed June 1, 2019) (rus).
7. Azatyan V.V. *Chain reactions in the processes of flame, explosion and detonation of gases : monograph*. Chernogolovka, 2017; 431. (rus).
8. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation : with 14 tables*. Einheitssacht, Technische Verbrennung, 2018; 15.
9. Fomin P.A., Chen J.-R. Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas. *Combustion Science and Technology*. 2009; 181(8):1038-1064. DOI: 10.1080/00102200902908535
10. Fomin P.A., Mitropetros K.S., Hieronymus H. Modeling of detonation processes in chemically active bubble systems at normal and elevated initial pressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003; 16(4):323-331. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00018-4
11. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Fleming suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type. *Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section*. 2019; 21. URL: <https://www.nist.gov/publications/suppression-effectiveness-aerosols-effect-size-and-flame-type>
12. Khalikov R.V. Electrochemical approach to volumetric fire extinguishing of gas compressor stations. *Actual Problems and Trends in the Development of Technosphere Safety in the oil and Gas Industry : proceedings of the II International scientific and practical conference. Ufa, 01 January-31 December 2019*. Ufa, 2019; 23-28. (rus).
13. Amor H.B., Elaoud A., Salah N.B., Elmoueddeb K. Effect of magnetic treatment on surface tension and water evaporation. *International Journal of Advance Industrial Engineering*. 2017. 5(3):119-124. DOI: 10.14741/Ijae/5.3.4
14. Redouane Mghaiouini, Aniss Elaoud, Toufik Garmim, Belghiti M.E., Valette Eric, Charles Henri Faure et al. The electromagnetic memory of water at kinetic condition. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2020; 10(1):11. DOI: 10.14741/ijcet/v.10.1.3
15. Liu H., Wang F. Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf. *PLOS ONE*. 2019; 14(9):e0222003. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
16. Chistyakov T.I. Influence of geometrical dimensions of temperature-activated water sprays on complex resistance at extinguishment of class E fires. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2017; 2:12-21. DOI: 10.25257/FE.2017.2.12-21 (rus).
17. Chistyakov T.I. Influence of electroporation parameters of temperature-activated water sprays on their complex impedance when extinguishing class E fires. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2018; 1:12-21. DOI:10.25257/FE.2018.1.63-71 (rus).
18. Chistyakov T.I. *The use of temperature-activated water in extinguishing electrical installations under voltage at power facilities : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia, 2020; 277. (rus).
19. Korobeynichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Shvartzberg V.M., Kutsenogiy K.P., Markov V.I. Application of aerosol technology and non-volatile effective fire suppressants for fire-fighting of various types of fires. *Interexpo Geo-Siberia*. 2012; 3:92-101. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (rus).
20. Korobeynichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Shvartzberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A. et al. Research of organophosphorus, organofluorine, metal-containing compounds and solid-fuel gas-generating compositions with additives of phosphorous-containing compounds as effective flame. *Physics of Flame and Explosion*. 2006; 42(6):64-73. (rus).

Поступила 02.12.2020, после доработки 26.12.2020;

принята к публикации 29.12.2020

Received December 2, 2020; Received in revised form December 26, 2020;

Accepted December 29, 2020

Информация об авторах

РОЕНКО Владимир Васильевич, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной техники в составе Учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

ЧИСТЯКОВ Тимур Игоревич, преподаватель отделения специальных дисциплин, Волгодонский учебный центр федеральной противопожарной службы, г. Волгодонск, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1031971; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

ТАРАКАНОВ Денис Вячеславович, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ в составе Учебно-научного комплекса «Пожаротушение», Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Иваново, Российская Федерация; РИНЦ ID: 587331; ORCID: 0000-0002-5811-7397; e-mail: den-pgs@yandex.ru

ХАЛИКОВ Ринат Валерьевич, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

Information about the authors

Vladimir V. ROENKO, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Fire Engineering as Part of Educational and Scientific Complex of Fire And Rescue Equipment, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

Timur I. CHISTYAKOV, Lecturer of Department of Special Disciplines, Volgodonsk Training Center of State Fire Service, Volgodonsk, Russian Federation; ID RISC: 1031971; ORCID: 0000-0002-0063-4260; e-mail: timurvdonsk@mail.ru

Denis V. TARAKANOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Fire Tactics and Fundamentals of Emergency Rescue and Other Urgent Work as Part of Educational and Scientific Complex Fire Fighting, Ivanovo Fire Rescue of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russian Federation; ID RISC: 587331; ORCID: 0000-0002-5811-7397; e-mail: den-pgs@yandex.ru

Rinat V. KHALIKOV, Postgraduate Student, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru