

УДК 614.841.41:614.849

doi: 10.37657/vniipo.avpb.2022.32.40.003

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЫМОВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ГОРЕНИИ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Андрей Леонидович Чибисов*¹, *Дмитрий Вячеславович Федоткин*², *Елена Алексеевна Соина*², *Андрей Павлович Инчиков*²

¹ ООО «Специальные проекты и системы».

² Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. Разработана методика и получены экспериментальные данные зависимости концентрации аэрозоля от удельной поверхности и времени горения щелочных металлов. Предложена и оценена адекватность математической модели процесса образования аэрозоля при горении щелочных металлов. Также определены кинетические зависимости изменения концентрации аэрозоля в газовой фазе от времени горения, что в совокупности позволяет рассчитать количество и концентрацию аэрозоля щелочных металлов, образующихся при их горении.

Ключевые слова: щелочные металлы, пожарная опасность, дымовыделение, дымовые аэрозоли, кинетические закономерности

Для цитирования: Чибисов А.Л., Федоткин Д.В., Соина Е.А., Инчиков А.П. Исследование кинетики образования дымовых аэрозолей при горении щелочных металлов // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. № 3 (13). С. 30–35. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.32.40.003>.

INVESTIGATION OF THE KINETICS OF SMOKE AEROSOL FORMATION DURING COMBUSTION OF ALKALI METALS

*Andrey L. Chibisov*¹, *Dmitry V. Fedotkin*², *Elena A. Soina*², *Andrey P. Inchikov*²

¹ Special Projects and Systems, LLC.

² All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. The methodology was developed and there were obtained experimental data on the dependence of aerosol concentration on specific surface and combustion time of alkali metals. Adequacy of mathematical model of process of aerosol formation during combustion of alkali metals is proposed and evaluated. The kinetic dependencies of the change in the concentration of aerosol in the gas phase on the combustion time are also determined. It enables to calculate the amount and concentration of aerosol of alkali metals formed during their combustion.

Keywords: alkali metals, fire hazard, smoke emission, smoke aerosols, kinetic patterns

For citation: Chibisov A.L., Fedotkin D.V., Soina E.A., Inchikov A.P. Investigation of the kinetics of smoke aerosol formation during combustion of alkali metals. Aktual'nye Voprosy Pozharnoi Bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2022, no. 3, pp. 30-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.32.40.003>.

В современной промышленности широко применяются щелочные металлы на различных стадиях производства, при этом количество металлов весьма значительно, что требует рассматривать их как источник, в некоторых случаях основной, опасных факторов пожара. Горение щелочных металлов сопровождается интенсивным дымовыделением, которое создает значительные трудности при эвакуации персонала и тушении пожаров.

Для оценки степени задымленности при пожаре и условий эвакуации персонала и действий пожарных подразделений были проведены эксперименты, в которых исследовали процесс дымовыделения при горении лития, натрия, натрий-калиевой эвтектики, рубидия, цезия.

Исследование кинетики и механизма горения щелочных металлов проводили в камере размером $2,10 \times 4,05 \times 1,82$ м с герметичными боковыми стенками и потолком. Торцевые стенки камеры были закрыты одним слоем полиэтиленовой пленки. Нагретые до температуры воспламенения металлы, находившиеся в стальном поддоне, помещали в камеру и контролировали концентрацию аэрозоля, время горения по показаниям тепловизора. Перед началом экспериментов и после окончания горения определяли массу образцов с погрешностью ± 10 г, начальную температуру фиксировали с помощью хромель-алюмелевой термопары и потенциометра с погрешностью ± 5 °С. Концентрацию аэрозоля в объеме камеры определяли путем отсоса известного количества воздуха через фильтр с последующим титрованием водного раствора фильтрата.

По результатам экспериментов были построены кинетические кривые изменения концентрации аэрозоля в газовой фазе от времени горения. Приблизительно при достижении пиковой концентрации происходило прекращение интенсивного дымовыделения, которое считали концом горения металла (рис. 1).

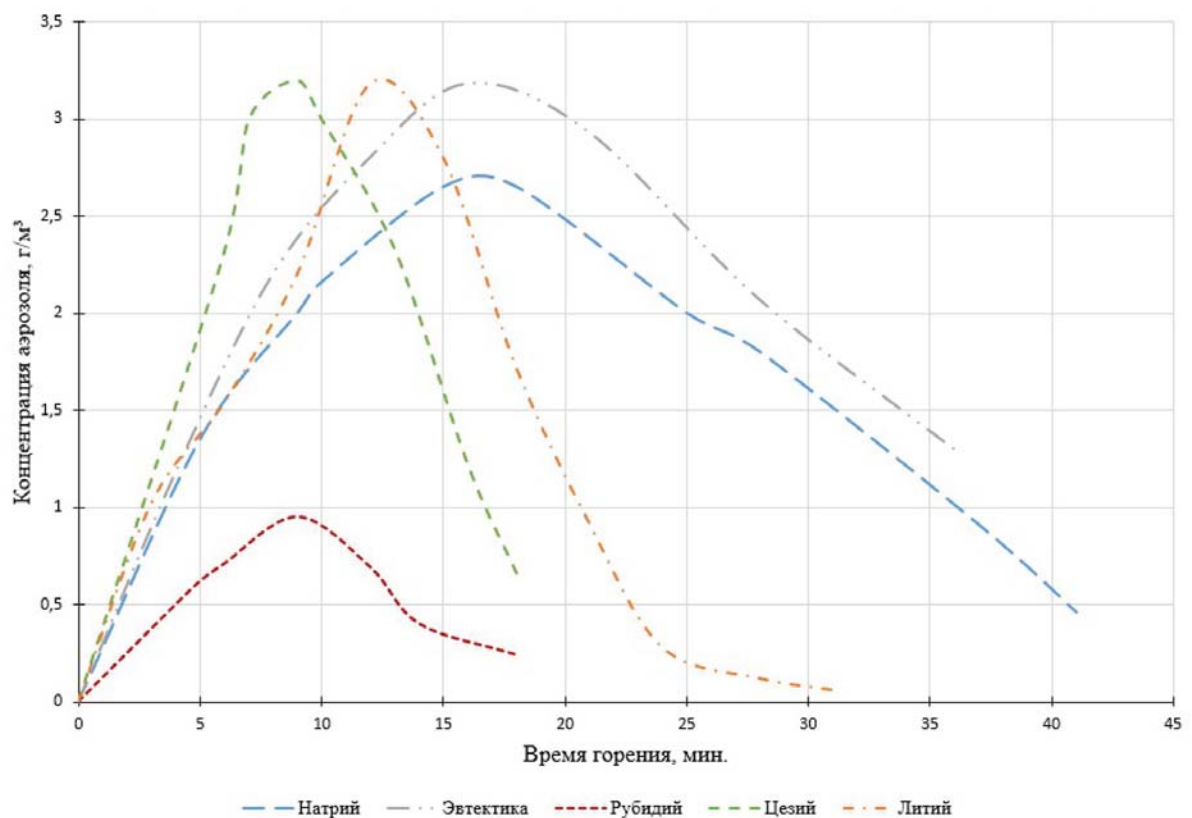


Рис. 1. Кинетические кривые изменения концентрации аэрозоля в газовой фазе от времени горения

Следует отметить, что начальная и конечная массы образцов были практически одинаковы. Расчет количества выделившегося аэрозоля при горении металла определяли двумя способами: по экспериментальным данным изменения концентрации аэрозоля в объеме и теоретически – по количеству кислорода воздуха, поступившего к поверхности раздела за счет естественной конвекции.

Расчет количества выделившегося аэрозоля по экспериментальным данным проводился с использованием кривых изменения концентрации аэрозоля, пересчитанного на чистый металл, от времени горения (рис. 1).

Скорость изменения концентрации аэрозоля можно описать следующими уравнениями:

$$\left(\frac{dc}{d\tau_1}\right) = \frac{WK_1S}{V} - K_2C; \quad (1)$$

$$\left(\frac{dc}{d\tau_2}\right) = -K_2C, \quad (2)$$

где C – концентрация металла, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; W – скорость горения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; S – площадь поверхности горения, м^2 ; V – объем помещения, м^3 ; K_1, K_2 – константы уравнения.

Уравнение (1) описывает восходящую часть графика (рис. 1), уравнение (2) – нисходящую часть кривой.

Решая систему данных уравнений, определяем количество оксида, выделившегося в аэрозоль (X):

$$X = K_2C + \left(\frac{dc}{d\tau_1}\right). \quad (3)$$

Количество металла, перешедшего в аэрозоль ($m_{\text{аэ.экс}}$), определяем из уравнения химической реакции [1].

В основу расчета количества выделившегося аэрозоля по количеству кислорода воздуха, поступившего к поверхности раздела за счет естественной конвекции, положено предположение, что весь поток кислорода воздуха (Π) идет на окисление металла:

$$\Pi = \alpha S \rho_k \Delta C = 0,3 \alpha S, \quad (4)$$

где Π – поток кислорода, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; α – коэффициент массообмена, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; S – площадь поверхности горящего металла, м^2 ; ρ_k – плотность кислорода, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; ΔC – концентрационный напор.

Скорость подвода кислорода, который идет на горение металла, определяется скоростью «всплывания» разогретого воздуха. Процессы переноса тепла и массы хорошо изучены [2, 3] и описываются следующей критериальной зависимостью:

$$Nu = c(Gr, Pr)n, \quad (5)$$

где Nu, Gr, Pr – критерии Нуссельта, Грасгофа и Прандтля; c, n – опытные коэффициенты, равные соответственно 0,135 и 1/3 при $(Gr, Pr) > 2 \cdot 10^7$.

$$Nu = \frac{\alpha l}{D}; \quad (6)$$

$$Gr = \frac{gl\beta\Delta T}{\nu}; \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c\rho\nu}{\lambda}, \quad (8)$$

где l – характерный размер, м ; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$; β – коэффициент объемного расширения; ΔT – разность температур, К ; ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; c_p – удельная

теплоемкость, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Коэффициент диффузии D определяем по методике, изложенной в книге [5].

Количество кислорода, связанного в выделившемся аэрозоле, определяем по формуле

$$m_{\text{O}_2\text{аэ}} = \frac{\Pi \tau}{(1 + K')}, \quad (9)$$

где τ – время горения, с; K' – коэффициент, характеризующий соотношение кислорода и металла, определяется из уравнения химической реакции.

Количество металла в выделившемся аэрозоле определяется по формуле

$$m_{\text{Меаэ}} = m_{\text{O}_2\text{Ме}} = \Pi \tau - m_{\text{O}_2\text{аэ}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{O}_2\text{Ме}}$ – количество кислорода, перешедшего в металл, кг.

Все расчеты проводились для температуры горения, равной 900°C .

На рис. 2 показано соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

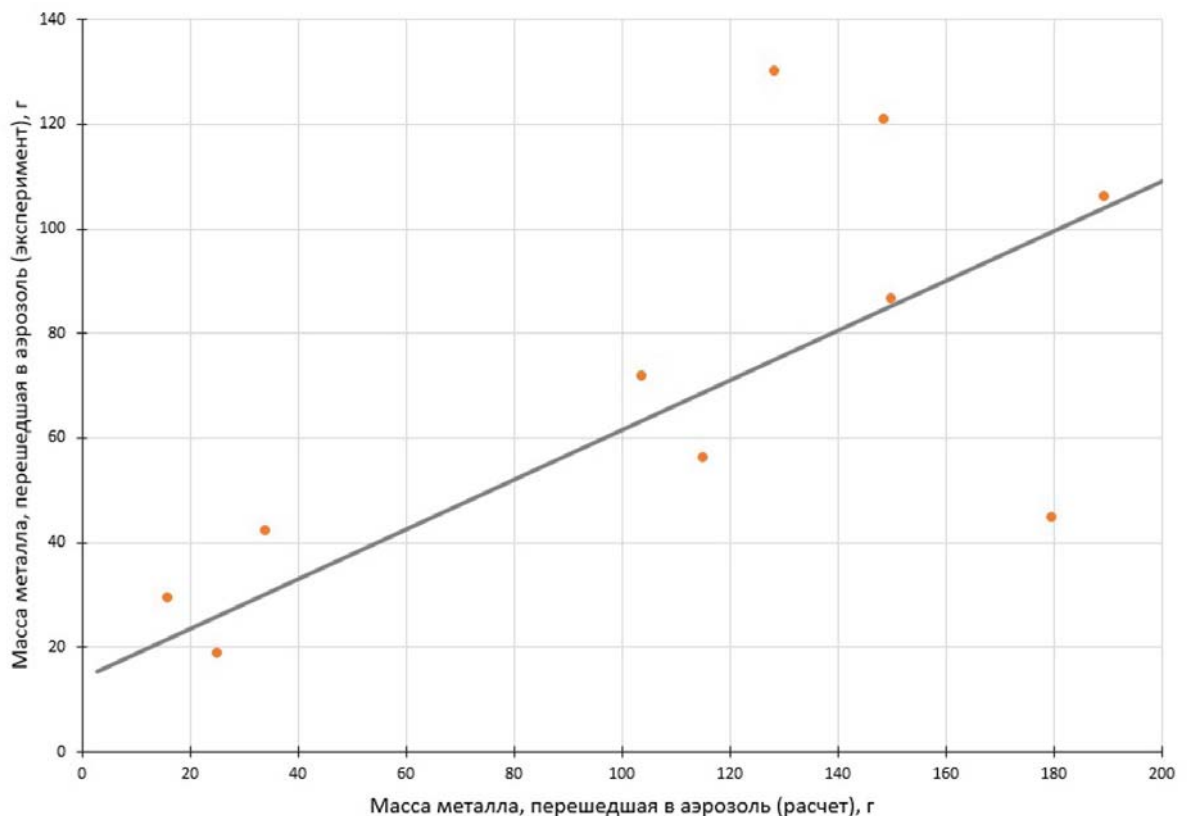


Рис. 2. Соответствие расчетных и экспериментальных результатов

Тангенс угла наклона полученной регрессионной зависимости равен 0,49. Следовательно, экспериментальные данные занижены по сравнению с расчетными примерно в 2 раза. Это можно объяснить тем, что при расчете использовался эмпирический коэффициент n в зависимости (5), который соответствовал массообмену с нагретой горизонтальной пластиной ($s = 0,135$) [4]. В нашем случае свободная поверхность металла была ограничена стенками поддона, препятствующими подводу кислорода. Кроме того, расхождение экспериментальных и расчетных данных может быть связано с ошибками при определении концентрации, температуры горячей поверхности, значение которой было выбрано по литературным данным. Разница в результатах небольшая, если учитывать условия эксперимента и сделанные допущения. Таким образом, полученные данные служат надежным обоснованием значения массы металла, перешедшего в аэрозоль.

Время горения металла в основном зависит от его удельной поверхности (рис. 3). Количество массы металла, перешедшего в аэрозоль, также зависит от удельной поверхности (рис. 4).

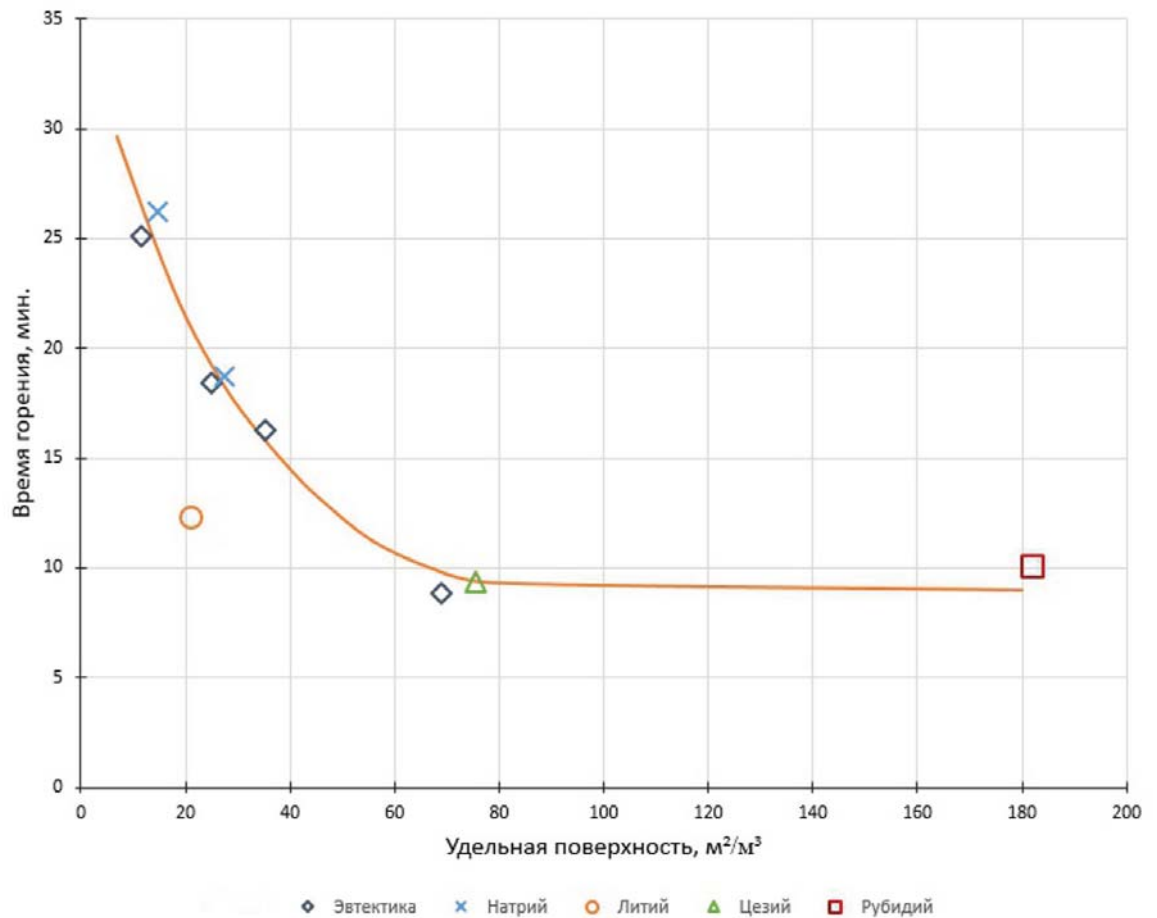


Рис. 3. Зависимость времени горения металла от его удельной поверхности

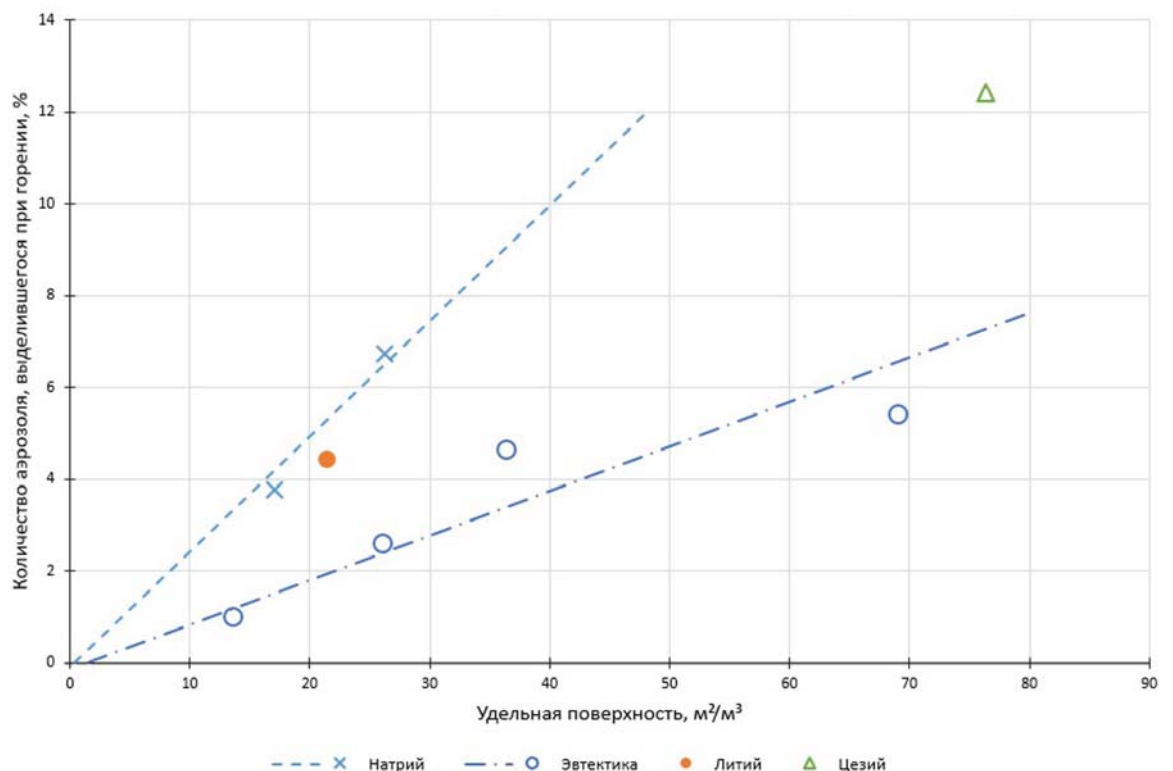


Рис. 4. Зависимость массы металла, перешедшего в аэрозоль, от удельной поверхности

Полученное экспериментально распределение точек говорит о том, что при увеличении числа опытов возможно получить надежную зависимость количества аэрозоля от удельной поверхности горящего металла, которую следует оценивать как обратную величину высоты слоя металла h^{-1} . По значениям этой величины определяется количество выделившегося аэрозоля.

Заключение

На основании вышеизложенного разработана методика и получены экспериментальные данные зависимости концентрации аэрозоля от удельной поверхности и времени горения щелочных металлов. Осуществлена оценка адекватности предложенной математической модели процесса выделения аэрозоля при горении щелочных металлов. Определены кинетические зависимости изменения концентрации аэрозоля в газовой фазе от времени горения. Данные результаты позволяют рассчитать количество и концентрацию аэрозоля щелочных металлов, образующихся при их горении. Это важный показатель для определения времени наступления критических значений опасных факторов пожара и тактики тушения пожара подразделениями пожарной охраны, что является предметом рассмотрения последующих публикаций, планируемых авторами.

Список литературы

1. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Т. 1. М.: Мир, 1971.
2. Шорин С.Н. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1964.
3. Избранные труды 6-й Международной конференции по теплообмену. Перевод с англ. под ред. Б.С. Петухова. М.: Мир, 1981.
4. Башкирцев М.П. и др. Основы пожарной теплофизики. М.: Стройиздат, 1978. 200 с.
5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.

**Статья поступила в редакцию 06.06.2022;
одобрена после рецензирования 20.06.2022;
принята к публикации 27.06.2022.**

Чибисов Андрей Леонидович – доктор технических наук, консультант ООО «Специальные проекты и системы». E-mail: chibisov2@mail.ru.

Федоткин Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, начальник отдела. Тел. (495) 521-90-98. E-mail: special@vniipo.ru; **Соина Елена Алексеевна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Тел. (495) 524-82-56; **Инчиков Андрей Павлович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Тел. (495) 524-82-61.

Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Andrey L. Chibisov – Doctor of Technical Sciences, Consultant at "Special Projects and Systems" LLC. E-mail: chibisov2@mail.ru.

Dmitry V. Fedotkin – Candidate of Technical Sciences, Head of Department. Phone (495) 521-90-98. E-mail: special@vniipo.ru; **Elena A. Soina** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. Phone (495) 524-82-56; **Andrey P. Inchikov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Phone (495) 524-82-61.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.