

**В ЭТОМ НОМЕРЕ:****ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

<b>АНАЛИЗ СПОСОБОВ УЧЕТА ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ДВЕРЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ЗДАНИЙ ЖИЛОГО И ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b> <i>Карпов А. В., Ушаков Д. В., Абашкин А. А., Карпова И. А.....</i>	<b>3</b>
<b>МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ. ЧАСТЬ 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА</b> <i>Мухаметзянов Н. З., Султанов Р. М., Хафизов И. Ф.....</i>	<b>10</b>
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ИЗ ЗДАНИЯ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ</b> <i>Юлтыев Ш. Р.....</i>	<b>17</b>
<b>ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТОКСИЧНОСТЬ ПРОДУКТОВ ТЕРМОЛИЗА И СПОСОБНОСТЬ К ДЫМООБРАЗОВАНИЮ</b> <i>Мельдер Е. В., Злобнов П. В., Сивенков А. Б.....</i>	<b>27</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ГОРОДСКОМ ПАССАЖИРСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ</b> <i>Минкин Д. Ю., Кубанов И. Н.....</i>	<b>47</b>
<b>СВЕРХЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ</b> <i>Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н.....</i>	<b>58</b>
<b>АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА</b> <i>Кононенко Е. В., Мокроусова О. А., Черкасский Г. А., Миронов А. Н.....</i>	<b>72</b>
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МОДУЛЬНЫХ ГАЗОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ</b> <i>Тимофеев А. Б.....</i>	<b>81</b>
<b>ОЦЕНКА ОБРАЗЦОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ</b> <i>Логинов В. В., Вишняков А. В., Зубарев И. А.....</i>	<b>90</b>

**БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

<b>АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО СПОСОБАМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД С 2014 ПО 2022 ГОДЫ</b> <i>Кректунов А. А., Ефимов И. А., Васьков Я. Н., Залесов С. В.....</i>	<b>101</b>
<b>АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАВОДКООПАСНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД С 2013 ПО 2023 ГОД</b> <i>Королев Д. С., Вытовтов А. В., Рябущенко А. С., Русских Д. В.....</i>	<b>112</b>

УДК 614.841

**АНАЛИЗ СПОСОБОВ УЧЕТА ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ДВЕРЕЙ  
ПРИ РАСЧЕТЕ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ЗДАНИЙ ЖИЛОГО  
И ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ****Карпов Алексей Васильевич, Ушаков Дмитрий Викторович,  
Абашкин Александр Анатольевич, Карпова Ирина Алексеевна**

Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г Балашиха, Московская область, Россия

**АННОТАЦИЯ**

Одним из важнейших показателей, характеризующих эффективность противопожарных мероприятий, применяемых для обеспечения безопасной эвакуации людей в жилых и общественных зданиях, является значение индивидуального пожарного риска. Несмотря на то, что методика для расчета указанной величины в течении долгого времени используется для решения практических задач и постоянно совершенствуется, остаются моменты, по-разному понимаемые расчетчиками, сотрудниками контрольно-надзорных органов и другими специалистами. Одним из моментов, вызывающих большое количество вопросов при расчете пожарного риска является способ учета противопожарных дверей. Причина этого заключается в том, что ни в методике для расчета пожарного риска в жилых и общественных зданиях, ни в пособии по ее применению не говорится о необходимости и способе их учета. В этой связи в работе проведен анализ положений методики, на основе которого разъяснен порядок учета противопожарных дверей в соответствии с ее действующей редакцией. Рассмотрены существующие подходы к учету противопожарных дверей, сформулированы необходимые требования к соответствующему алгоритму, а также предложена формула для расчета пожарного риска с учетом наличия противопожарных дверей.

**Ключевые слова:** пожарный риск, жилые и общественные здания, коэффициент соответствия, система противопожарной защиты, противопожарные двери

**ANALYSIS OF THE APPROACHES TO TAKING INTO ACCOUNT THE FIRE DOORS  
WHEN CALCULATING FIRE RISK FOR RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS****Aleksey V. Karpov, Dmitry V. Ushakov, Alexander A. Abashkin, Irina A. Karpova**

All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia, Balashikha, Moscow region, Russian Federation

**ABSTRACT**

The individual fire risk is the important indicator which characterize the effectiveness of fire protective measures used to ensure the safe evacuation of people in residential and

public buildings. Despite the fact that the methodology for calculating this value has been used for a long time to solve practical problems and is constantly being improved, there are moments that are understood differently by calculators, employees of control and supervisory authorities and other specialists. One of the items that cause a large number of questions when calculating fire risk is the method of accounting for fire doors. The reason for this is that neither the methodology for calculating fire risk in residential and public buildings, nor the manual for its application, says about the need and method of their accounting. So the analysis is carried out of the methodology requirements, on the basis of which the accounting procedure for fire doors is explained in accordance with its actual version. The existing approaches to accounting the fire doors are considered, the requirements for the appropriate algorithm are formulated, and the formula for calculating fire risk is proposed, taking into account the presence of fire doors.

**Keywords:** fire risk, residential and public buildings, compliance coefficient, fire protection system, fire doors

### Введение

В соответствии с Федеральным Законом [1] одним из показателей обеспечения пожарной безопасности объектов является пожарный риск. В частности, для жилых и общественных зданий таким показателем является значение индивидуального пожарного риска, определяемое в соответствии с Методикой [2]. Указанная методика широко применяется для научных исследований и решения практических задач пожарной безопасности, поскольку позволяет проводить оценку эффективности противопожарных мероприятий с учетом ее индивидуальных особенностей.

Сотрудники ФГБУ ВНИИПО МЧС России регулярно проводят анализ применения указанной методики с целью выявления направлений её совершенствования, а также нарушений и неточностей допускаемых при проведении расчетов. С результатами данного анализа можно ознакомиться, например, в [4].

Одним из моментов, вызывающих большое количество вопросов при расчете пожарного риска, является способ учета противопожарных дверей. Причина этого заключается в том, что ни в Методике [2], ни в пособии по ее применению [3]

ни слова не говорится о необходимости и способе их учета.

### Основная часть

Наиболее простой способ учета, использованный в частности в работе [5], заключается в том, чтобы считать, что противопожарная дверь все время закрыта, и полностью предотвращает распространение опасных факторов пожара. Аналогичный подход предложен в работе [6] с той лишь разницей, что в ней дверь принимается закрытой не сразу, а по окончании эвакуации через нее последнего человека. В поддержку своей точки зрения сторонники такого подхода приводят следующие аргументы:

— в соответствии с частью 8 статьи 88 Федерального Закона [1] «противопожарные двери и ворота должны иметь устройства для самозакрывания. Противопожарные двери, ворота, шторы, люки и клапаны, которые могут эксплуатироваться в открытом положении, должны быть оборудованы устройствами, обеспечивающими их автоматическое закрывание при пожаре»;

— в соответствии с пунктом 14 Правил противопожарного режима [8] «устройства для самозакрывания дверей

должны находиться в исправном состоянии. Не допускается устанавливать какие-либо приспособления, препятствующие нормальному закрыванию противопожарных или противодымных дверей (устройств)»;

— в соответствии с пунктом 24 Правил противопожарного режима «руководитель организации обеспечивает наличие на противопожарных дверях и воротах и исправное состояние приспособлений для самозакрывания и уплотнений в притворах, а на дверях лестничных клеток, дверях эвакуационных выходов, в том числе ведущих из подвала на первый этаж (за исключением дверей, ведущих в квартиры, коридоры, вестибюли (фойе) и непосредственно наружу), приспособлений для самозакрывания» [8].

Следовательно, поскольку указанные требования носят обязательный характер, двери и устройства для самозакрывания должны всегда находиться в исправном состоянии и выполнять возложенную на них функцию.

На первый взгляд данные аргументы выглядят убедительно, однако практическая реализация такого подхода может приводить к недооценке пожарной опасности объектов. В частности, при такой постановке задачи установка противопожарной двери в проеме помещения очага пожара позволяет обосновать устройство единственного выхода с этажа при любой площади этажа и количестве размещаемых на нем людей. Незадымляемую лестничную клетку можно заменить на обычную, оборудованную противопожарными дверями (некоторые проектировщики предлагают даже обычные двери с доводчиками и уплотнением в притворах). Можно отказаться от устройства систем автоматического пожаротушения и противодымной защиты и т. д.

Очевидно, что причина несоответствия результатов расчета с использованием предлагаемого подхода и объективной реальности заключается в том, что, несмотря на обязательность вышеперечисленных требований, противопожарные двери далеко не всегда выполняют возложенную на них задачу. Именно поэтому отечественные и зарубежные нормативные документы, помимо использования в необходимых случаях противопожарных дверей, предусматривают и иные мероприятия по обеспечению пожарной безопасности объекта

В методике [2] ни для одной из систем противопожарной защиты, учет которых предусмотрен методикой, вероятность срабатывания не принимается равной единице, несмотря на то что требования о поддержании указанных систем в исправном состоянии также содержатся в нормативных правовых актах. Хотя в явном виде такие показатели, как вероятности срабатывания систем, в методике отсутствуют, они учитываются через коэффициенты соответствия требованиям нормативных документов.

Может быть, в отличие от других систем, вероятность того, что противопожарные двери не закроются, как следует в соответствии с предъявляемыми требованиями, настолько мала, что ею можно пренебречь? Найти статистические данные по состоянию противопожарных дверей в России авторам, к сожалению, не удалось. Однако существуют соответствующие зарубежные данные. В частности, в соответствии с таблицей А.17 документа [7] вероятность блокировки пожарных дверей в открытом состоянии составляет 0,3, а вероятность того, что самозакрывающиеся двери не закроются, как следует по требованию (исключая те, которые заблокированы в открытом состоянии), – 0,2. Таким образом, фактически вероятность невыполнения противопожарной дверью

возложенной на нее задачи весьма существенна, и ею нельзя пренебрегать при проведении расчетов.

Помимо аргументов по существу вопроса сторонниками «абсолютной эффективности противопожарных дверей» часто используется следующий формально-логический аргумент. В соответствии с пунктом 31 методики [2] «для получения исходных данных, необходимых для проведения расчетов, предусмотренных настоящей Методикой, следует использовать справочные источники информации и проектную документацию здания». Согласно разъяснениям ФГБУ ВНИИПО МЧС России в качестве справочных источников информации может быть использована официально опубликованная нормативная, научная и методическая литература. Отсюда делается вывод, что противопожарные двери можно учитывать в соответствии с любым подходом, описанным в научной литературе. Особенно часто при этом делаются ссылки на работу [6]. Однако данная последовательность рассуждений противоречит положениям методики, поскольку в соответствии с пунктом 20 Методики задание состояния проемов относится к «формулировке сценария развития пожара», а не к «исходным данным». Следовательно, пункт 31 не является основанием для использования научной статьи в качестве руководства по учету противопожарных дверей.

В разъяснениях ФГБУ ВНИИПО МЧС России неоднократно писалось, что состояние дверных проемов (в том числе с заполнением противопожарными дверями) определяется таким образом, чтобы в рассматриваемом сценарии пожара соблюдалось требование пункта 7 Методики: о том, что «при расчете рассматриваются сценарии пожара, при которых реа-

лизуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей». Для выполнения данного требования двери на пути эвакуации из помещения очага пожара, как правило, считаются открытыми, поскольку при таком сценарии пожара происходит наиболее быстрое распространение опасных факторов пожара в направлении эвакуационных выходов. Двери в других помещениях, выходящих в коридор, принимаются закрытыми, поскольку при таком сценарии пожара не происходит «растекания» продуктов горения по объему здания, и на путях эвакуации достигаются максимальные значения опасных факторов пожара. При наличии обычной лестничной клетки, дверь в лестничную клетку также считается открытой, позволяя опасным факторам пожара распространяться через объем лестничной клетки на другие этажи здания.

Конечно, данный подход не является идеальным, поскольку он фактически игнорирует защитное действие противопожарных дверей, однако он полностью соответствует положениям действующих на сегодняшний день нормативных правовых актов, и при его использовании не происходит недооценки пожарной опасности объекта.

Вместе с тем, противопожарные двери, безусловно, ограничивают распространение опасных факторов, следовательно, в соответствии с пунктом 24 Методики они должны учитываться в числе соответствующих дополнительных противопожарных мероприятий, направленных на снижение значения пожарного риска.

В работе [9] значение пожарного риска для объектов классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф1.3, Ф1.4 предлагается определять согласно формуле (1):

$$Q_{B,i} = Q_{П,i} \times [(1 - P_{э,i}) + (1 - P_{э,i}) \times P_{СП,i}] \times (1 - K_{ППД,i}), \quad (1)$$

При этом коэффициент  $K_{ППД,i}$  рассчитывается из соотношения (2):

$$K_{\text{ППД},i} = 1 - (1 - K_{\text{Обн},i} \times K_{\text{ПД},i}) \times (1 - K_{\text{Обн},i} \times K_{\text{ПД},i} \times K_{\text{СОУЭ},i}), \quad (2)$$

где  $K_{\text{ПД},i}$  – коэффициент, учитывающий влияние на пожарный риск противопожарных дверей. Остальные обозначения соответствуют методике [3].

Значение  $K_{\text{ПД},i}$  принимается равным 0,8, если противопожарные двери установлены и соответствуют требованиям пожарной безопасности, в противном случае  $K_{\text{ПД},i} = 0$ .

Данный подход выгодно отличается от концепции «абсолютной эффективности» противопожарных дверей наличием коэффициента, который учитывает возможность их несрабатывания. Однако он содержит ряд недостатков.

Во-первых, в формуле для расчета  $K_{\text{ППД},i}$  (аналог коэффициента  $K_{\text{Пз},i}$  методики [2]) отсутствует коэффициент, учитывающий систему противодымной защиты.

Во-вторых, неясно как определять коэффициент  $K_{\text{ПД},i}$ , если противопожарная дверь используется в качестве дополнительного мероприятия, то есть ее установка не требуется в соответствии с нормативными документами. Как в этом случае оценивать ее соответствие требованиям?

В-третьих, введение коэффициента  $K_{\text{ПД},i}$  так, как это сделано в описанном алгоритме, фактически приводит к тому, что установка одной противопожарной двери по своей эффективности эквивалентна оборудованию всего здания такими системами противопожарной защиты, как система пожарной сигнализации или СОУЭ, что представляется не соответствующим реальности.

В-четвертых, коэффициент  $K_{\text{ПД},i}$  вводится в формулу чисто формально, без всякого расчета принципа работы противопожарных дверей и систем противопожарной защиты. Из формулы (1) следует, что если противопожарная дверь не соответствует требованиям пожарной безопасно-

сти  $K_{\text{ПД},i} = 0$ , то  $K_{\text{ППД},i} = 0$ , и наличие систем пожарной сигнализации и СОУЭ не оказывает влияние на величину пожарного риска, что неверно, поскольку указанные системы работают абсолютно независимо от противопожарной двери. И, наоборот, при отсутствии системы пожарной сигнализации не учитывается противопожарная дверь, тогда как в большинстве случаев устройство самозакрывания двери срабатывает без использования пожарной сигнализации.

### Заключение

Из проведенного выше анализа следует:

- 1) наличие противопожарных дверей должно учитываться при расчетах пожарного риска;
- 2) необходимо учитывать вероятность невыполнения противопожарными дверями возложенных на них функций;
- 3) наличие противопожарных дверей не может быть учтено с помощью коэффициента соответствия нормативным требованиям, аналогичного коэффициентам, используемым в Методике [2] для системы пожарной сигнализации, системы оповещения и управления эвакуацией при пожаре и системы противодымной защиты, поскольку указанными системами оборудуется все здание (пожарный отсек), а противопожарные двери размещаются локально.

В связи с этим в проекте новой методики, разработанной специалистами ФГБУ ВНИИПО МЧС России был предложен подход к учету противопожарных дверей, используемых в качестве дополнительного противопожарного мероприятия и открываемых при эвакуации людей, в соответствии с которым значение пожарного

риска следует определять для двух случаев, а именно для открытого и закрытого положения двери. Затем итоговое значение индивидуального пожарного риска для  $i$ -го сценария пожара определяется по формуле (3):

$$R_i = P_{n.d.}^{откр} R_i^{откр} + P_{n.d.}^{закр} R_i^{закр}, \quad (3)$$

где  $P_{n.d.}^{откр} = 0,3$  – вероятность нахождения противопожарной двери в открытом положении;

$P_{n.d.}^{закр} = 0,7$  – вероятность нахождения противопожарной двери в закрытом положении;

$R_i^{откр}$  – величина пожарного риска для  $i$ -го сценария, рассчитанная при открытой противопожарной двери;

$R_i^{закр}$  – величина пожарного риска для  $i$ -го сценария, рассчитанная при закрытой противопожарной двери (опасные факторы пожара через дверь не распространяются).

Указанный подход удовлетворяет всем трем критериям, сформулированным в результате проведенного анализа.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон Российской Федерации от 22.07.2008 N 123-ФЗ (послед. ред.) // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России № 382 от 30.06.2009 (с изм.) // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
3. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» / А. А. Абашкин и др. 2-е изд., испр. и доп. М., 2014. 226 с.
4. Ограничение применения результатов расчета пожарного риска / А. А. Абашкин и др. // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. М. : ВНИИПО, 2017. С. 70–73.
5. Кузнецов Н. А., Малов В. В. Влияние объемно-планировочных решений на величину пожарного риска зданий административного назначения // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3. № 1 (9). С. 92–108.
6. Об эффективности применения противопожарных дверей в снижении предельно допустимых значений опасных факторов пожара и величины пожарного риска в зданиях и сооружениях различного функционального назначения / А. Б. Сивенков и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 4. С. 6–14.
7. PD 7974-7: 2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings — Part 7: Probabilistic risk assessment.
8. Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 16.09.2020 N 1479 // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 06.06.2023).
9. Тряпицын А. Б., Полунин Г. А. Анализ недостатков методики расчета пожарного риска в зданиях непромышленного назначения и разработка рекомендаций по ее совершенствованию // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1 (20). С. 44–49.

#### References

1. Federal Law from 22 July 2008 N123-FZ “Technical regulations on fire safety requirements”. (rus).
2. Method for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, VNIIPPO, 2016; 79. (rus).
3. Handbook on application of «Method for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard». Moscow, VNIIPPO, 2014. (rus).
4. Abashkin A.A., Karpov A.V., Poletaev A.N., Ushakov D.V Limitation of application of fire risk calculation-results. XXIX International scientific and practical conference, devoted to 80<sup>th</sup> anniversary of FGBU VNIIPPO of Emercom of Russia. 2017; 70–73. (rus).



5. Kuznetsov N.A., Malov V.V. The influence of spatial planning solutions on the value of fire risk in administrative buildings. XXI century. Technosphere safety. 2018; 1 (9): 92–108. (rus).

6. Sivenkov A.B., Zhuravlev S.Yu., Zhuravlev Yu.Yu., Medyanik M.V. About efficiency of the application of fire prevention doors in reduction of dangerous factors of fire and size of fire risk in buildings and constructions of various functional purposes. Fire and Explosion Safety. 2019; 4: 6-14. (rus).

7. PD 7974-7: 2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings — Part 7: Probabilistic risk assessment.

8. Resolution of the Government of the Russian Federation of September 16, 2020 No. 1479 "On approval of the Rules of fire protection in the Russian Federation". (rus).

9. Tryapitsyn A.B., Polunin G.A. Analysis of the shortcomings of the fire risk calculation methodology in non-industrial buildings and development of recommendations for its improvement. Siberian Fire and Rescue Bulletin, 2021; 1 (20): 44-49. (rus).

### Информация об авторах

**Карпов Алексей Васильевич**, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Россия, 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12; РИНЦ ID 338983; Scopus Author ID 56097627000; Researcher ID L-7707-2015; ORCID 0000-0002-0187-3159; e-mail: [avkhome@inbox.ru](mailto:avkhome@inbox.ru)

**Ушаков Дмитрий Викторович**, старший научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Россия, 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12; РИНЦ ID 751772; e-mail: [disva@yandex.ru](mailto:disva@yandex.ru)

**Абашкин Александр Анатольевич**, начальник отдела, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Россия, 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12; РИНЦ ID 1118056; e-mail: [vniipo@list.ru](mailto:vniipo@list.ru)

**Карпова Ирина Алексеевна**, старший научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Россия, 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12; РИНЦ ID 1061227; e-mail: [irina\\_karpova23@mail.ru](mailto:irina_karpova23@mail.ru)

### Information about authors

**Aleksey V. Karpov**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, VNI IPO of EMERCOM of Russia. VNI IPO, 12, Balashikha, Moscow region, 143903, Russia; ID RISC: 338983; Scopus Author ID 56097627000; Researcher ID L-7707-2015; ORCID 0000-0002-0187-3159; e-mail: [avkhome@inbox.ru](mailto:avkhome@inbox.ru)

**Dmitry V. Ushakov**, Senior Researcher, VNI IPO of EMERCOM of Russia, VNI IPO, 12, Balashikha, Moscow region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 751772; e-mail: [disva@yandex.ru](mailto:disva@yandex.ru)

**Alexander A. Abashkin**, Head of the department, VNI IPO of EMERCOM of Russia, VNI IPO, 12, Balashikha, Moscow region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1118056; e-mail: [vniipo@list.ru](mailto:vniipo@list.ru)

**Irina A. Karpova**, Senior Researcher, VNI IPO of EMERCOM of Russia, VNI IPO, 12, Balashikha, Moscow region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1118056; e-mail: [irina\\_karpova23@mail.ru](mailto:irina_karpova23@mail.ru)

УДК 699.81

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ  
НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ.  
ЧАСТЬ 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА**

**Мухаметзянов Назар Зинурович, Султанов Рифкат Мухатьярович,  
Хафизов Ильдар Фанилевич**

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

**АННОТАЦИЯ**

В статье на примере проектирования установки по добыче, сбору и транспорту продукции нефтяных скважин. рассматривается формирование расчетного алгоритма по определению эффективности проектируемых организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объектах нефтедобывающей отрасли. На практике выявлены некоторые особенности измерения и оценки организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, которые позволяют активно воздействовать на процессы проектирования объектов и тенденции их развития. Показана эффективность применения предлагаемого алгоритма расчета при оценке эффективности проектируемых мероприятий. Результаты практического применения методики расчета оценки организационно-технических мероприятий подтверждают возможность формирования расчетного алгоритма по определению эффективности проектируемых мероприятий, основанного на таких инструментах теоретического исследования, как метод дерева целей метод структуризации целей механизм анализа иерархий метод решающих матриц и метод экспертных оценок.

**Ключевые слова:** количественный показатель, дерево целей, метод структуризации целей, метод экспертных оценок, качественная характеристика оценки

**METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ASSESSMENT OF ORGANIZATIONAL  
AND TECHNICAL FIRE SAFETY MEASURES AT THE FACILITIES OF THE OIL INDUSTRY.  
PART 2. CALCULATION EXAMPLE**

**Nazar Z. Mukhametzyanov, Rifkat M. Sultanov, Il'dar F. Hafizov**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

**ABSTRACT**

The article is based on the example of designing an installation for the extraction, collection and transportation of oil well products. The formation of a computational algorithm to determine the effectiveness of the projected organizational and technical measures to ensure fire safety at the facilities of the oil industry is considered. In practice, some features of measuring and evaluating organizational and technical measures

to ensure fire safety have been identified, which make it possible to actively influence the processes of designing objects and trends in their development. The effectiveness of the proposed calculation algorithm in assessing the effectiveness of the planned measures is shown. The results of the practical application of the methodology for calculating the evaluation of organizational and technical measures confirm the possibility of forming a calculation algorithm to determine the effectiveness of the planned measures, based on such tools of theoretical research as the goal tree method; the goal structuring method; the mechanism for analyzing hierarchies; the method of decision matrices, the method of expert assessments.

**Keywords:** quantitative indicator, goal tree, goal structuring method, the method of expert assessments, qualitative characteristics of the assessment

### Введение

Данная статья является продолжением исследования, проведенного в первой части статьи. На примере расчета оценки организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объектах нефтедобывающей отрасли показано формирование расчетного алгоритма по определению эффективности проектируемых мероприятий [1–11].

В качестве объекта проектирования рассматривается установка по добыче, сбору и транспорту продукции нефтяных скважин.

### Материалы и методы

Для расчета используется дерево целей, получаемое в результате декомпозиции задачи разработки оценки организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности в иерархию и укрупненные группы элементов оценки организационно-технических мероприятий, разработанные в первой части статьи.

Строится множество матриц попарных сравнений для каждого из нижних уровней - по одной матрице для общей цели и для элементов 1, 2, и 3 (см. табл. 1–4).

**Таблица 1.** Матрица для общей цели  
**Tabl 1.** A matrix for a common purpose

№ No	Элемент Element	1	2	3	Вектор приоритетов Priority vector
1		1	1/2	1/2	0,200
2		2	1	1	0,400
3		2	1	1	0,400

Для таблицы 1 показатели: наибольшее собственное значение матрицы суждений; индекс согласованности; отношение согласованности соответственно равны  $\lambda=3,000$ ; ИС=0,000; ОС=0,000

**Таблица 2.** Матрица для элемента 1  
**Tabl 2.** Matrix for element 1

№ No	Элемент Element	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.2.3	Вектор приоритетов Priority vector
1	3.1.1	1	7	5	5	5	0,55
2	3.1.2	1/7	1	1/4	1/3	1/4	0,04
3	3.2.1	1/5	4	1	1	1/2	0,11
4	3.2.2	1/5	3	1	1	1/3	0,1
5	3.2.3	1/5	4	2	3	1	0,19

Для таблицы 2 показатели: наибольшее собственное значение матрицы суждений; индекс согласованности; отношение согласованности соответственно равны  $\lambda=5,08$ ; ИС=0,2; ОС=0,17.

**Таблица 3.** Матрица для элемента 2  
**Tabl 3.** Matrix for element 2

№ No	Элемент Element	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.2.3	Вектор приорите- тов Priority vector
1	3.1.1	1	6	3	4	5	0,46
2	3.1.2	1/6	1	1/3	1/5	1/4	0,04
3	3.2.1	1/3	3	1	1	1/2	0,12
4	3.2.2	1/4	5	1	1	1/4	0,16
5	3.2.3	1/5	4	2	4	1	0,2

Для таблицы 3 показатели: наибольшее собственное значение матрицы суждений; индекс согласованности; отношение согласованности соответственно равны  $\lambda=6,3$ ; ИС=1,33; ОС=1,18.

**Таблица 4.** Матрица для элемента 3  
**Tabl 4.** Matrix for element 3

№ No	Элемент Element	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.2.3	Вектор приоритетов Priority vector
1	3.1.1	1	6	3	5	4	0,5
2	3.1.2	1/6	1	1/4	1/5	1/6	0,04
3	3.2.1	1/3	4	1	2	1	0,18
4	3.2.2	1/5	5	1/2	1	2	0,14
5	3.2.3	1/4	6	1	1/2	1	0,14

Для таблицы 4 показатели: наибольшее собственное значение матрицы суждений; индекс согласованности; отношение согласованности соответственно равны  $\lambda=5,32$ ; ИС=1,08; ОС=0,96.

Следующим этапом является применение принципа синтеза. Для выявления составных приоритетов элементов локальные приоритеты располагаются по отношению к каждому соответствующему критерию, каждый вектор в столбце

умножается на приоритет соответствующего критерия и результат складывается вдоль каждой строки (см. табл. 5).

**Таблица 5.** Обобщенные приоритеты  
**Tabl 5.** Generalized priorities

№ No	Элемент Element	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.2.3	Обобщенные приоритеты Generalized priorities
1	1 (0,2)	0,55	0,04	0,11	0,10	0,19	0,2
2	2 (0,4)	0,46	0,04	0,12	0,16	0,20	0,4
3	3 (0,4)	0,50	0,04	0,18	0,14	0,14	0,4

### Результаты и их обсуждение

Оценка организационно-технических решений устанавливается по предложенной автором модификации метода решающих матриц [11].

Предложенная автором модификация метода решающих матриц состоит в следующем: формируется перечень  $\varphi$  (вектор с компонентами  $\varphi_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_\varphi$ ) – перечень экспертных мнений по достаточности и качеству разрабатываемых

мероприятий, от которых зависят подцели второго уровня и которые сгруппированы по организационным и техническим признакам. Результаты этой процедуры представлены в табл. 6.

После составления матрицы выявляются зависимости, по которым можно определить обоснованность и достаточность разрабатываемых организационно-технических мероприятий для реализации подцелей второго уровня.

**Таблица 6.**

Матрица отображения достаточности организационно-технических мероприятий для реализации подцелей второго уровня

**Tabl 6.**

Matrix for displaying the sufficiency of organizational and technical measures for the implementation of second-level sub-goals

Мероприятия Events	1	2	3
1 (3.1.1)	0,3 × 0,9	0,3 × 0,9	0,3 × 0,9
2 (3.1.2)	0,3 × 0,9	0,1 × 0,9	0,2 × 0,9
3 (3.2.1)	0,2 × 0,3	0,1 × 0,2	0,2 × 0,1
4 (3.2.2)	0,1 × 0,7	0,4 × 0,6	0,2 × 0,5
5 (3.2.3)	0,1 × 0,8	0,1 × 0,4	0,1 × 0,3

В качестве примера оценка достаточности всей совокупности мероприятий для достижения требуемой эффективности принимается равной единице:

$$1) 1 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,2 + 1 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,4 + 1 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,4 = 0,270;$$

$$2) 1 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,2 + 1 \times 0,1 \times 0,9 \times 0,4 + 1 \times 0,2 \times 0,9 \times 0,4 = 0,162;$$

$$3) 1 \times 0,2 \times 0,3 \times 0,2 + 1 \times 0,1 \times 0,2 \times 0,4 + 1 \times 0,2 \times 0,1 \times 0,4 = 0,028;$$

$$4) 1 \times 0,1 \times 0,7 \times 0,2 + 1 \times 0,4 \times 0,6 \times 0,4 + 1 \times 0,2 \times 0,5 \times 0,4 = 0,150;$$

$$5) 1 \times 0,1 \times 0,8 \times 0,2 + 1 \times 0,1 \times 0,4 \times 0,4 + 1 \times 0,1 \times 0,3 \times 0,4 = 0,044;$$

Полученная зависимость дает отображение разрабатываемых организационно-технических мероприятий на их оценку эффективности.

Заключительным этапом является оценка разрабатываемых организационно-технических мероприятий, по которой можно сделать вывод об эффективности разрабатываемых мероприятий.

С этой целью полученные выше количественные показатели экспертных оценок по достаточности и качеству разрабатываемых мероприятий, от которых зависят подцели второго уровня и которые сгруппированы по организационным и техническим признакам, суммируются:

$$0,270 + 0,162 + 0,028 + 0,150 + 0,044 = \\ = \mathbf{0,654}.$$

Полученное значение по шкале качественных оценок соответствует качественной характеристике организационно-технических мероприятий как "**хорошее**".

Приведенный расчет для наглядности возможно проводить с помощью электронных таблиц Excel.

### Заключение

Рассмотренный пример подтверждает возможность формирования расчетного алгоритма по определению эффективности проектируемых мероприятий, основанного на таких инструментах теоретического исследования, как метод дерева целей; метод структуризации целей механизм анализа иерархий метод решающих матриц и метод экспертных оценок.

Таким образом, иллюстрируется возможность измерения и оценки организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, что позволяет отслеживать и корректировать проектируемые мероприятия, а также планировать дальнейшее совершенствование процесса разработки проектной документации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мухаметзянов Н. З., Султанов Р. М. Анализ системы экспертизы проектной документации по обеспечению пожарной безопасности объектов строительства // Нефтегазовое дело. 2022. № 5. С. 21–38.
2. Шаров И. Н. Эффективность оценки соответствия требованиям пожарной безопасности в форме федерального государственного пожарного надзора: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 256 с.
3. Трунева В. А. Совершенствование методов определения расчетных величин пожарного риска для производственных зданий и сооружений нефтегазовой отрасли: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 175 с.
4. Мухаметзянов З. Р., Олейник П. П. Формирование организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 11. С. 35–41.
5. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон Российской Федерации N 116-ФЗ от 21.07.1997 (послед. ред.) // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.06.2023).

6. О техническом регулировании : федер. закон Российской Федерации N 184-ФЗ от 27.12.2002 (послед. ред.) // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
7. Рудченко Г. И. Совершенствование способов и методов обеспечения пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации дошкольных образовательных учреждений: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 184 с.
8. Нгуен С. Х. Обоснование противопожарных требований к конструкциям и объемно-планировочным решениям подземных автостоянок в многоэтажных зданиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 170 с.
9. Мухаметзянов Н. З., Хафизов Ф. Ш. Классификация параметров организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтяной промышленности // Нефтегазовое дело. 2022. № 5. С. 39–54.
10. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.
11. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М., 1981. 488 с.

### References

1. Mukhametzyanov N.Z., Sultanov R.M. Analysis of the system of examination of project documentation to ensure fire safety of construction facilities. Oil and gas business. 2022; 5:21-38. Doi <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2022-5-21-38> (rus).
2. Sharov I.N. The effectiveness of the assessment of compliance with fire safety requirements in the form of federal state fire supervision. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. - Moscow, 2013; 256. (rus).
3. Truneva V. A. Improvement of methods for determining calculated fire risk values for industrial buildings and structures of the oil and gas industry. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2015; 175. (rus).
4. Mukhametzyanov Z.R., Oleinik P.P. Formation of Organizational and Technological Solutions for the Construction of Industrial Complexes. Industrial and Civil Engineering. 2019; 11:35-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.35-41 (rus).
5. Russian Federation. Laws: Federal Law No. 116-FZ "On Industrial Safety of Hazardous Production facilities": [adopted by the State Duma on June 20, 1997]. Moscow: Code, 1997. (rus).
6. Russian Federation. Federal Law No. 184-FZ of December 27, 2002 "On Technical Regulation". - Access mode: <http://base.consultant.ru> . (rus).
7. Rudchenko G. I. Improvement of methods and methods of ensuring fire safety in the design and operation of preschool educational institutions. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. - Volgograd, 2013; 184. (rus).
8. Nguen S. Kh. Justification of fire-fighting requirements for structures and space-planning solutions of underground parking lots in multi-storey buildings in Vietnam. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2012; 170. (rus).
9. Mukhametzyanov N.Z., Khafizov F.Sh. Classification of parameters of organizational and technical measures to ensure fire safety of oil industry facilities. Oil and gas business. 2022; 5:39-54. doi <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2022-5-39-54> (rus).
10. Saati T., Kerns K. Analytical planning. Organization of systems. Moscow, Radio and communications, 1991. (rus).
11. Moiseev N.N. Mathematical problems of system analysis. Moscow, The science. The main editorial office of the physical and mathematical literature, 1981. (rus).

### Информация об авторах

**Мухаметзянов Назар Зинурович**, аспирант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», Уфимский государ-

### Information about the authors

**Nazar Z. Mukhametzyanov**, Graduate Student of Fire and Industrial Safety Department, Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, 450062, Russian Federation;

ственный нефтяной технический университет, Россия 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1;

e-mail: [chief.mr-nazar@yandex.ru](mailto:chief.mr-nazar@yandex.ru)

**Султанов Рифкат Мухатьярович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062 г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1;

e-mail: [sultanov55@mail.ru](mailto:sultanov55@mail.ru)

**Хафизов Ильдар Фанилевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1;

e-mail: [ildar.hafizov@mail.ru](mailto:ildar.hafizov@mail.ru)

e-mail: [chief.mr-nazar@yandex.ru](mailto:chief.mr-nazar@yandex.ru)

**Rifkat M. Sultanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Fire and Industrial Safety Department, Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, 450062, Russian Federation;

e-mail: [sultanov55@mail.ru](mailto:sultanov55@mail.ru)

**Ildar F. Hafizov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Fire and Industrial Safety Department, Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, 450062, Russian Federation;

e-mail: [ildar.hafizov@mail.ru](mailto:ildar.hafizov@mail.ru)



УДК 614.8.084

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ИЗ ЗДАНИЯ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Юлтыев Шамиль Рамильевич

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия

### АННОТАЦИЯ

Проведение всестороннего анализа состояния пожарной безопасности объектов защиты является трудоемким мероприятием. Поэтому не удивительно, что в настоящее время используются разные методы и способы. Характерным примером является применение гибкого подхода в обеспечении пожарной безопасности, реализуемого посредством компьютерного моделирования на базе специального программного обеспечения. В этом случае консолидируются различные математические методы (зональный, полевой, интегральный), которые описывают термодинамические процессы неконтролируемого горения. В настоящей работе проведен автоматизированный расчет времени эвакуации людей при пожаре, времени воздействия опасных факторов пожара и других параметров на примере объекта исследования – типовой общеобразовательной школы. Выбор такого объекта обоснован целым комплексом психофизиологических особенностей у детей разной возрастной группы, а также типовыми объемно-планировочными решениями, характерными для архитектуры 1950-х -- 1990х гг., не соответствующими современным требованиям. По результатам компьютерного моделирования было установлено несколько закономерностей, осложняющих решение проблемы по безопасной эвакуации людей, проведена всесторонняя оценка проблем, получена целостная картина. Автором отмечено, что применяемые современные методы не являются идеальными или уникальными, но использование их в совокупности, в том числе с соблюдением режимных мероприятий, позволит минимизировать или вовсе исключить человеческие жертвы.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, моделирование, эвакуация, угроза жизни, пожар

## RESEARCH OF PROBLEMS OF ENSURING SAFE EVACUATION FROM THE BUILDING OF A GENERAL EDUCATIONAL ORGANIZATION

Shamil R. Yul'tyev

Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

### ABSTRACT

Carrying out a comprehensive analysis of the state of fire safety of protected objects is a laborious undertaking. Therefore, it is not surprising that different methods and methods are currently used. A typical example is the use of a flexible approach to fire safety,

implemented through computer simulation based on special software. In this case, various mathematical methods (zonal, field, integral) are consolidated, which describe the thermodynamic processes of uncontrolled combustion. In this paper, an automated calculation of the time of evacuation of people in case of fire, the time of exposure to dangerous fire factors and other parameters is carried out using the example of the object of study - a typical secondary school. The choice of such an object is justified by a whole complex of psychophysiological characteristics in children of different age groups, as well as by typical space-planning solutions typical for the architecture of the 1950s - 1991, which do not meet modern requirements. Based on the results of computer simulation, several patterns were established that complicate the solution of the problem of safe evacuation of people, a comprehensive assessment of the problems was carried out, and a complete picture was obtained. The author noted that the modern methods used are not ideal or unique, but their use in combination, including compliance with security measures, will minimize or completely eliminate human casualties.

**Keywords:** fire safety, modeling, evacuation, life threat, fire

### Введение

Применение целого комплекса современных систем обеспечения пожарной безопасности на объекте считается высоким показателем степени защиты [1]. Однако, существующие требования могут противоречить друг другу, а зачастую избыточное количество мероприятий дублирует некоторые функции, оказывая негативное влияние на финансовую составляющую вопросов безопасности [2]. Поэтому гибкий подход применения компьютерного моделирования является приоритетным направлением [3].

Общий перечень проблемных вопросов при эвакуации широко известен [4-7]. Эвакуация в школах осложняется психофизиологическими особенностями детей и имеет ряд особенностей:

- неоднородность эвакуирующегося людского потока, обусловленного различным возрастом учеников [8];
- эмоциональная незрелость детей, не способность самостоятельно принимать взвешенные решения [9];
- высокая вероятность получения травм во время давки смешанных возрастных групп учениками младших классов [10];

– организационные правила проведения эвакуации, установленные в школах, замедляющие процесс выхода из здания [11].

Отметим, что общеобразовательные организации являются объектами повышенной социальной ориентированности, поэтому пожарная безопасность должна обеспечиваться на самом высоком уровне [12]. Для этого разрабатываются и применяются современные нормы проектирования [13], предусматривается увеличенное количество эвакуационных выходов, размер ширины коридоров, лестничных маршей и дверей. Предусмотрены правилами и отрабатываются раз в полугодие действия по отработке эвакуации в случае пожара, среди персонала и учеников.

Особенностью является то, что эксплуатирующийся фонд школьных зданий в большей степени относится к архитектурному периоду 1950–1990-х гг. Многие из указанных зданий не подвергались техническому перевооружению и не соответствуют действующим нормам в области противодымной защиты, пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты [14]. В исследовании

предложено использовать математическое моделирование для всесторонней оценки проблем при эвакуации на примере рассматриваемой типовой школы [15, 16].

Для получения целостной картины условий эвакуации произведено моделирование опасных факторов пожара (ОФП) [17]. Соотнесение результатов времени эвакуации и блокирования позволяет комплексно оценить безопасность эвакуации [18].

Таким образом, для проверки условий безопасности, всесторонней оценки проблем при эвакуации и получения целостной картины проведем математическое моделирование, реализуемое специальным программным обеспечением Fogard [20, 21]. Объектом исследования будет являться образовательное учреждение, а предметом исследования – моделирование эвакуации людей при пожаре.

### Результаты и их обсуждение

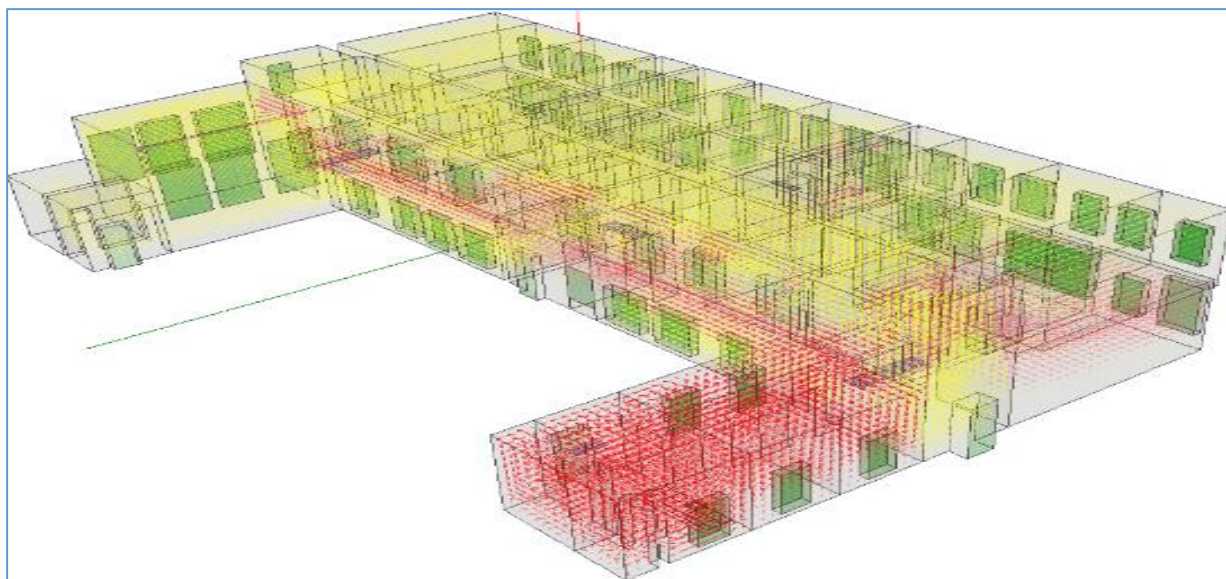
Местом возникновения горения принимается помещение кабинета труда, ниже представлены основные параметры расчета: начальная температура воздуха в помещении – 21 °С; начальное давление воздуха в помещении – 101325 Па; температура наружного воздуха – 38 °С; масса горючей нагрузки, приходящаяся на единицу площади поверхности горения – 200 кг/м<sup>2</sup>;

Параметры горючей нагрузки: низшая теплота сгорания деревянных изделий – 14 МДж/кг; линейная скорость распространения пламени – 0,0045 м/с; удельная массовая скорость выгорания – 0,0137 кг/(м<sup>2</sup>·с.); дымообразующая способность – 47,7 Нп·м<sup>2</sup>/кг; количество СО, выделяющегося при сгорании 1 кг вещества, – 0,03 кг/кг; количество СО<sub>2</sub> выделяющегося при сгорании 1 кг вещества, –

1,478 кг/кг; количество HCl, выделяющегося при сгорании 1 кг вещества, – 0,0058 кг/кг; количество О<sub>2</sub>, поглощающегося при сгорании 1 кг вещества, – 1,369 кг/кг; среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени – 40 кВт/м<sup>2</sup>.

Расчетное время эвакуации людей из здания устанавливается по времени выхода из него последнего человека [22]. Перед началом моделирования процесса эвакуации задается схема эвакуационных путей в здании [23]. Все эвакуационные пути подразделяются на эвакуационные участки длиной  $a$  и шириной  $b$ . Длина и ширина каждого участка пути эвакуации для проектируемых зданий принимаются по проекту, а для построенных – по фактическому положению. Длина пути по лестничным маршам измеряется по длине марша. Длина пути в дверном проеме принимается равной нулю. Эвакуационные участки могут быть горизонтальные и наклонные (лестница вниз, лестница вверх и пандус). За габариты человека в плане принимается эллипс с размерами осей 0,5 м (ширина человека в плечах) и 0,25 м (толщина человека). Основные этапы моделирования представлены на рис. 1. Результаты моделирования представлены в таблице и на рис. 2, 3.

На рис. 1 показано образование и распространение одного из опасных факторов пожара – дыма, максимально затрудняющего успешную эвакуацию детей при возникновении неконтролируемого горения в здании школы. Можно наблюдать, как формируются зоны задымления с максимальной концентрацией (показано красным) на первом этаже и стремительным переходом задымления на вышележащий этаж (показано желтым, концентрация дыма не критична).



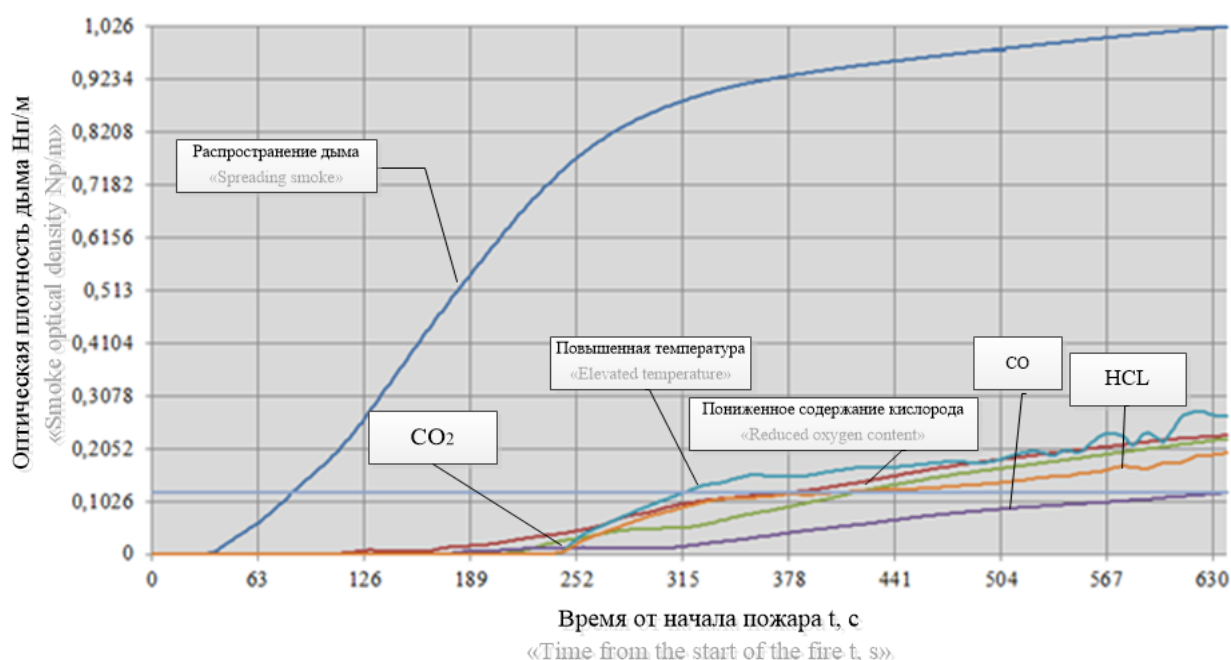
**Рис. 1.** Моделирование эвакуации людей при пожаре из здания школы

**Fig.1.** Modeling the evacuation of people in case of fire from a school building

Это связано с тем, что зона задымления представляет собой аэрозоль (смесь воздуха и газообразных продуктов горения), который легко вовлекается в движение любыми конвективными потоками и разносится на разные расстояния. В результате складывающейся обстановки продукты горения уменьшают видимость, способствуют увеличению времени эвакуации людей и вызывают у них отравление.

На рис. 2 показан график стремительного распространения дыма по отношению к другим опасным факторам пожара (повышенной температуры, пониженному содержанию кислорода, распространению углекислого и угарного газов

и т. д.). Отметим, что зона задымления, формирующаяся на начальном этапе в геометрической прогрессии, достигает предельных концентраций продуктов горения. Происходит линейное заполнение объема помещений уже на 630 секунде, при этом понижается содержание кислорода, и вдыхаемых горючих газов становится все больше. В условиях затрудненного дыхания и потери видимости организованное движение групп детей нарушается, становится хаотичным, время эвакуации увеличивается.



**Рис. 2.** График воздействия опасного фактора пожара

**Fig.2.** Fire hazard exposure graph

На рис. 3 представлена объективная схема эвакуации людей при пожаре, формируемая специальным программным комплексом в автоматическом режиме. В соответствии с методикой расчета пожарного риска, моделирование позволило выбрать одну из трех возрастных групп: младшая до 9 лет, средняя 10-13 лет, старшая 14-16 лет,

В упрощенной аналитической модели эвакуации ученики на участках после первого идут сплошным потоком, не детализируя место каждого обучающегося, при этом исходными данными для каждого человека является площадь горизонтальной проекции.

Например, для ребенка младшей группы в школьной форме она составляет 0,04 м<sup>2</sup>/чел. Следовательно, можно рассчитать, что в местах наибольшей интенсивности на 1 м<sup>2</sup> эвакуационного прохода будет приходиться 25 детей. Данный пример вызывает опасения за корректность

методики и безопасность эвакуации из здания. Однако, процесс пожара и процесс эвакуации – это сложные явления, описываемые математически с рядом допущений.

Поэтому при моделировании был введен коэффициент безопасности для увеличения времени начала эвакуации, позволивший компенсировать допущения методики и увеличить степень защиты обучающихся.

Анализируя результаты, представленные в таблице, автор отмечает, что задымление является первым опасным фактором пожара, влияющим на успешную эвакуацию людей. Это связано с тем, что на 59 секунде с момента начала распространения дыма, начинается воздействие на людей, а на 68 секунде концентрация продуктов горения повышается до значений, не совместимых с человеческой жизнью.

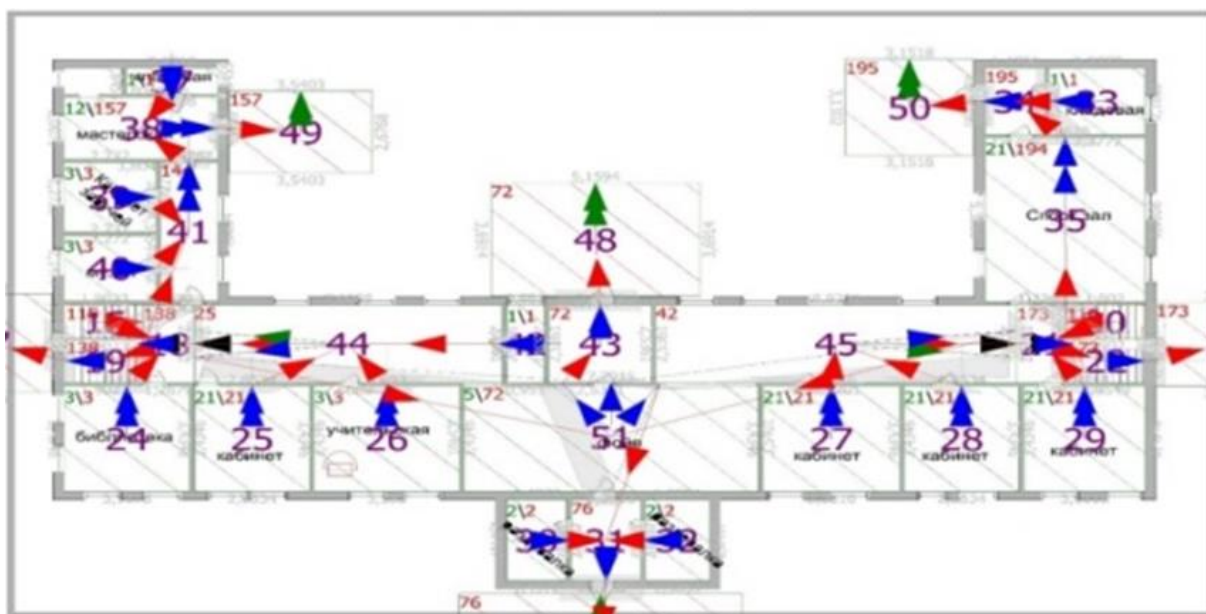


Рис. 3. Схема эвакуации людей при пожаре

Fig.3. Scheme of evacuation of people in case of fire

Таблица. Результаты расчетов необходимого времени эвакуации

Table. The results of calculations of the required evacuation time

Помещение Room	Время достижения предельно-допустимых значений по ОФП с учётом коэффициента безопасности = 0,8, с. The time to reach the maximum permissible values for the OFP, taking into account the safety factor of 0.8, s							Время начала блокировки Blocking start time	№ участка № site	Время эвакуации Evacuation time
	T, °C	O <sub>2</sub>	Плотность дыма Smoke density	HCl	CO <sub>2</sub>	CO	Тепловой поток Heat flow			
Кабинет труда Cabinet of Labor	87,2	100,0	67,2	510,4	510,4	510,4	58,4	58,4	17	50,3
Главный выход Main exit	510,4	510,4	302,4	510,4	510,4	510,4	510,4	302,4	23	199,0
Лестница 2 Staircase 2	510,4	510,4	333,6	510,4	510,4	510,4	510,4	333,6	47	310,7
Спортзал Gym	510,4	510,4	510,4	510,4	510,4	510,4	510,4	510,4	48	312,2
Лестница 1 Staircase 1	510,4	510,4	252,8	510,4	510,4	510,4	510,4	252,8	49	223,5
Раздевалка Locker room	510,4	510,4	324,0	510,4	510,4	510,4	510,4	324,0	50	313,6

Также по результатам моделирования процесса эвакуации людей при

пожаре из общеобразовательного учреждения были сформулированы некоторые особенности эвакуации:

– анализ результатов эвакуации из общеобразовательного учреждения [24] показал не однородность психической реакции на пожар у школьников. Преимущественно у средних и старших классов проявляется радость и эмоциональное перевозбуждение от известия о пожаре. Систематически выявляются случаи, когда ученики убегают на разведку в зону предполагаемого очага пожара. Кроме того, при подтверждении информации о загорании и наличия следов задымления на путях эвакуации, общая масса учеников склонна к паническим неконструктивным действиям, а численное моделирование не позволяет проверить весь спектр эмоциональных реакций и предугадать действия учеников;

– поэтому в целях предотвращения травм во время эвакуации в требованиях пожарной безопасности ученики младших классов располагаются на нижних этажах или в отдельных частях здания, имеющих выделенный эвакуационный выход;

– в рассматриваемом объекте защиты младшие классы выходят непосредственно наружу через лестничную клетку. Таким образом, инструменты математического моделирования позволяют определить пути эвакуации и разработать решения, предотвращающие слияние потоков значительно отличающихся по возрасту детей;

– важным элементом является действия учителей по организованному выводу детей из школы в составе класса. Отметим, что нормы пожарной безопасности предписывают скорейшее покидание объекта защиты после объявления эвакуации, при этом формирование школьников в группу требует от учителя дополнительных временных затрат, но позволяет избежать проблем, описанных выше. Такой

подход формально противоречит расчетным принципам, заложенным в методике оценки пожарного риска. Поскольку численные методы моделирования, представленные в правилах расчета, не позволяют производить эвакуацию в составе класса. Полученный результат ставит под сомнение корреляцию численного моделирования и данных фактического времени эвакуации из школы;

– характерной проблемой являются случаи с закрытыми дверьми эвакуационных выходов на ключ, навесной замок и утепление их ковром, тогда разработанная в проекте система распределения эвакуационных потоков будет разрушена, а это приведет к слиянию людских масс, панике, давке и человеческим жертвам.

Рассматриваемая методика цифрового моделирования не является идеальной, но позволяет определить параметры эвакуации обеспечивающей безопасность людей находящихся в здании, а в совокупности с соблюдением режимных мероприятий обеспечивается эффективная защита от пожара.

### **Выводы**

В расчёте эвакуации принимали участие группы людей разной возрастной категории. С учетом применения современных систем обеспечения пожарной безопасности (пожарной автоматики и т. д.) люди успевают эвакуироваться до момента воздействия на них опасных факторов пожара. Кроме того, применение автоматизированного способа расчета времени эвакуации, времени начала блокировки и др. повышает оперативную работу, минимизирует возникновение вероятности гибели людей, а также обеспечивает гибкий подход в разработке мероприятий пожарной безопасности.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Кончаков С. А., Королев Д. С. Оценка влияния цифровых технологий на пожарную безопасность нефтегазовых объектов // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2022. № 1. С. 95–105.
2. Gilbert, S.W. Estimating Smoke Alarm Effectiveness in Homes. *Fire Technol* 57, 1497–1516 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01072-z>.
3. Kountouris, Y. An Assessment of the Relationship Between Daylight Saving Time, Disruptions in Sleep Patterns and Dwelling Fires. *Fire Technol* 57, 123–144 (2021). – DOI 10.1007/s10694-020-00983-1.
4. Тимофеев В. Д. Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 69–77.
5. Панов А. А., Журавлев С. Ю., Журавлев Ю. Ю. Независимая оценка риска и исходные данные для расчета пожарного риска в общественных зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 5. С. 9–18.
6. Новые средства обеспечения эвакуации в общественных зданиях с массовым пребыванием людей / В. Д. Захматов, С. А. Турсенев, М. В. Чернышов и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27. № 5. С. 61–69.
7. Вытовтов А. В., Королев Д. С., Федоров А. В. Математическое моделирование процесса спасения маломобильных групп населения при пожаре // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2020. № 4. С. 126–131.
8. Bode, N.W.F., Codling, E.A. Exploring Determinants of Pre-movement Delays in a Virtual Crowd Evacuation Experiment. *Fire Technol* 55, 595–615 (2019).
9. Ramli, N., Ghani, N.A., Ahmad, N. et al. Psychological Response in Fire: A Fuzzy Bayesian Network Approach Using Expert Judgment. *Fire Technol* 57, 2305–2338 (2021). – DOI 10.1007/s10694-021-01106-0
10. Kholshchevnikov V. V. Study of children evacuation from pre-school education institutions / V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, A. P. Parfyonenko, I. P. Belosokhov // *Fire and Materials*. – 2012. – Vol. 36. – No 5-6. – P. 349-366
11. Zhiming, F., Wei, L., Xiaolian, L. et al. A Multi-Grid Evacuation Model Considering the Threat of Fire to Human Life and its Application to Building Fire Risk Assessment. *Fire Technol* 55, 2005–2026 (2019). – DOI 10.1007/s10694-019-00840-w.
12. Исследование особенностей процесса эвакуации для объектов культурного наследия / Т. Ю. Еремина и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 1. С. 54–66.
13. Минкин Д. Ю., Мироньчев А. В., Кондрашин А. В. Перспективы развития технического регулирования противодымной защиты зданий // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 3 (35). С. 23–28.
14. Лоскутов Н. В., Мироньчев А. В., Чижков А. Г. Осуществление государственного контроля за системами пожарной сигнализации в условиях применения механизма «регуляторной гильотины» // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 1 (57). С. 59–68.
15. Vytovtov A.V., Korolev D.S., Barankevich R.V., Sitnikov I.V., Russkikh D.V. Mathematical model for an identifying flaming combustions and accidents by an unmanned aerial vehicle at oil and gas industry facilities/ В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, – 2020. – 52032
16. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Kargashilov D.V., Odnolko A.A., Denisov M.S. Mathematical simulation of the forecasting process of the fire hazard properties of substances / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, – 2020. – 52025.
17. Вытовтов А. В., Сушко Е. А., Королев Д. С. Анализ возможных рисков пожарной опасности на действующем объекте защиты нефтегазовой отрасли // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2021. № 2. С. 44–51.
18. Шмырева М. Б., Русских Е. А., Королев Д. С. Методика оценки материального ущерба в случае возникновения и развития чрезвычайной ситуации на объекте нефтегазовой отрасли // Техносферная безопасность. 2021. № 3 (32). С. 67–76.
19. Deere S. et al. An evacuation model validation data-set for high-rise construction sites // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120. – С. 103118.
20. Gubanova O.A. Monitoring of technogenic destructions of oil and gas facilities using 3D laser scanning. / Gubanova O.A., Lovchikov V.A., Mironchev A.V., Cheshko I.D., Krutolapov A.S. // *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. – 2018. – Т. 7. № 4. – С. 210-212.



21. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering // Fire Safety Journal. – 2021. – Т. 120. – С. 103020. – DOI 10.1016/j.firesaf.2020.103020.
22. Kodur, V.K.R., Venkatachari, S. & Naser, M.Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. Fire Technol 56, 2035–2057 (2020). – DOI 10.1007/s10694-020-00965-3.
23. Chu, M.L., Law, K.H. Incorporating Individual Behavior, Knowledge, and Roles in Simulating Evacuation. Fire Technol 55, 437–464 (2019).
24. Hamilton, G.N., Lennon, P.F. & O’Raw, J. Toward Fire Safe Schools: Analysis of Modelling Speed and Specific Flow of Children During Evacuation Drills. Fire Technol 56, 605–638 (2020). – DOI 10.1007/s10694-019-00893-x.

### References

1. Konchakov S.A., Korolev D.S. Assessment of the impact of digital technologies on the fire safety of oil and gas facilities / Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2022; 1: 95–105. (rus).
2. Gilbert S.W. Estimating Smoke Alarm Effectiveness in Homes. Fire Technol. 2021; 57: 1497–1516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01072-z>.
3. Kountouris, Y. An Assessment of the Relationship Between Daylight Saving Time, Disruptions in Sleep Patterns and Dwelling Fires. Fire Technol. 2021; 57: 123–144. DOI 10.1007/s10694-020-00983-1.
4. Timofeev V. D. The relevance of research on the level of awareness of students living in a hostel about fire safety. Fire and Explosion Safety. 2020; 1: 69– 77. (rus).
5. Panov A. A., Panov A. A., S. Yu. Zhuravlev, Yu. Yu. Zhuravlev. Fire and explosion safety. 2019; 5: 9-18. DOI 10.18322/PVB.2019.28.05.9-18. (rus).
6. Zakhmatov V. D., Tursenev S. A., Chernyshov M. V., Adaev A. A., Bekasov A.V. New means of ensuring evacuation in public buildings with mass stay of people. Fire and explosion safety. 2018; 27(5): 61– 69. DOI 10.18322/PVB.2018.27.05.61-69. (rus).
7. Vytovtov A.V., Korolev D.S., Fedorov A.V. Mathematical modeling of the process of rescuing people with limited mobility in case of fire. Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2020; 4: 126– 131. (rus).
8. Bode, N.W.F., Codling, E.A. Exploring Determinants of Pre-movement Delays in a Virtual Crowd Evacuation Experiment. Fire Technol. 2019. No 55. Pp. 595–615.
9. Ramli N., Ghani N.A., Ahmad N. et al. Psychological Response in Fire: A Fuzzy Bayesian Network Approach Using Expert Judgment. Fire Technol. 2021; 57: 2305–2338. DOI 10.1007/s10694-021-01106-0
10. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, A. P. Parfyonenko, I. P. Belosokhov Study of children evacuation from pre-school education institutions. Fire and Materials. 2012; 36 (5– 6): 349-366.
11. Zhiming F., Wei L., Xiaolian L. et al. A Multi-Grid Evacuation Model Considering the Threat of Fire to Human Life and its Application to Building Fire Risk Assessment. Fire Technol. 2019; 55: 2005–2026. DOI 10.1007/s10694-019-00840-w.
12. Eremina T. Yu., Bogdanov A. V., Sushkova O. V., Yug A. Study of the features of the evacuation process for cultural heritage objects. Fire and Explosion Safety. 2019; 28 (1): 54–66. DOI 10.18322/PVB.2019.28.01.54-66. (rus).
13. Minkin D.Yu., Mironchev A.V., Kondrashin A.V. Prospects for the development of technical regulation of smoke protection of buildings. Problems of risk management in the technosphere. 2015; 3 (35): 23–28. (rus).
14. Loskutov N.V., Mironchev A.V., Chizhkov A.G. Implementation of state control over fire alarm systems in the conditions of using the "regulatory guillotine" mechanism. Problems of risk management in the technosphere. 2021; 1 (57): 59–68. (rus).
15. Vytovtov A.V., Korolev D.S., Barankevich R.V., Sitnikov I.V., Russkikh D.V. Mathematical model for an identifying flaming combustions and accidents by an unmanned aerial vehicle at oil and gas industry facilities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 52032 (rus).
16. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Kargashilov D.V., Odnolko A.A., Denisov M.S. Mathematical simulation of the forecasting process of the fire hazard properties of substances. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 52025. (rus).
17. Vytovtov A.V., Sushko E.A. Korolev D.S. Analysis of possible fire hazard risks at the existing oil and gas industry protection facility. Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2021; 2: 44–51. (rus).

18. Shmyreva M.B., Russkikh E.A. Korolev D.S. Methodology for assessing material damage in the event of the occurrence and development of an emergency at an oil and gas industry facility. Technospheric safety. 2021; 3 (32): 67–76. (rus).
19. Deere S. et al. An evacuation model validation data-set for high-rise construction sites. Fire Safety Journal. 2021; 120: 103118.
20. Gubanova O.A., Lovchikov V.A., Mironchev A.V., Cheshko I.D., Krutolapov A.S. Monitoring of technogenic destructions of oil and gas facilities using 3D laser scanning. International Journal of Engineering and Technology(UAE). 2018; 4: 210–212. (rus).
21. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. Fire Safety Journal. 2021; 120: 103020. DOI 10.1016/j.firesaf.2020.103020.
22. Kodur V.K.R., Venkatachari S. & Naser M.Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. Fire Technol. 2020; 56: 2035–2057. DOI 10.1007/s10694-020-00965-3. (rus).
23. Chu M.L., Law K.H. Incorporating Individual Behavior, Knowledge, and Roles in Simulating Evacuation. Fire Technol. 2019; 55: 437–464.
24. Hamilton G.N., Lennon P.F. & O'Raw J. Toward Fire Safe Schools: Analysis of Modeling Speed and Specific Flow of Children During Evacuation Drills. Fire Technol. 2020; 56: 605–638. DOI 10.1007/s10694-019-00893-x.

### Информация об авторе

**Юлтыев Шамиль Рамильевич**, старший преподаватель, Академия гражданской защиты МЧС России, Россия, 141435, Московская область, г. Химки, ул. Соколовская, стр. 1А; РИНЦ ID 858388; e-mail: [shyultyev@yandex.ru](mailto:shyultyev@yandex.ru)

### Information about the authors

**Shamil R. Yultyev**, Senior Lecturer, Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia Sokolovskaya st., building 1A, Khimki, 141435, Moscow region; ID RISC 858388; e-mail: [shyultyev@yandex.ru](mailto:shyultyev@yandex.ru)

УДК 699.812.3

## **ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТОКСИЧНОСТЬ ПРОДУКТОВ ТЕРМОЛИЗА И СПОСОБНОСТЬ К ДЫМООБРАЗОВАНИЮ**

**Мельдер Егор Владимирович, Злобнов Петр Викторович, Сивенков Андрей Борисович**

Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Россия

### **АННОТАЦИЯ**

В статье представлены результаты исследования токсичности продуктов термолиза и дымообразующей способности вспучивающихся огнезащитных покрытий для стальных конструкций при воздействии высоких температур (пожара). Полученные результаты свидетельствуют о том, что огнезащитные покрытия, нанесенные на конструкции, как и пожарная нагрузка, находящаяся в здании или сооружении, могут вносить вклад в общую токсикологическую обстановку на пожаре и дымообразование.

Исследования по оценке динамики выхода токсичных продуктов термолиза, а также по определению коэффициента дымообразования проведены в отношении огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе различные по своей химической природе компоненты.

Огневые испытания проведены с использованием экспериментальной установки при воздействии на стальной образец с огнезащитой внешнего радиационного теплового потока различной интенсивности. Анализ интенсивности выхода токсичных продуктов термолиза и дымообразующей способности проведен с позиций взаимосвязи процесса формирования вспученного теплоизолирующего слоя. Рассматриваются стадии химических превращений, при которых происходит активное образование токсичных продуктов термолиза, таких как монооксид углерода, диоксид углерода и цианистый водород.

Изучение дымообразующей способности вспучивающихся покрытий свидетельствует о возможности получения огнезащитных покрытий с различной степенью дымообразования (группы дымообразующей способности Д1—Д3 по ГОСТ 12.1.044-89 п. 4.18) в зависимости от компонентного состава и величины плотности внешнего радиационного теплового потока. Установлено, что значительный вклад в образование токсикантов и дымообразующую способность вносит химическая природа связующего огнезащитного покрытия.

Обращается внимание на необходимость комплексной разработки огнезащитных покрытий с учетом не только стандартных характеристик огнезащиты (вязкость, адгезия к защищаемой подложке, коэффициент вспучивания, огнезащитная эффективность), но и токсичности продуктов термолиза и дымообразования.

**Ключевые слова:** термолиз, средства огнезащиты, стальные конструкции, огнезащитные вспучивающиеся (интумесцентные) покрытия, вспучивание, пенококс, токсичность продуктов термолиза, дымообразующая способность

**THE EFFECT OF THE COMPONENT COMPOSITION OF INTUMESCENT FLAME RETARDANT COATINGS ON THE TOXICITY OF THERMOLYSIS PRODUCTS AND THE ABILITY TO SMOKE****Egor V. Melder, Peter V. Zlobnov, Andrey B. Sivenkov**

SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

**ABSTRACT**

The article presents the results of a study of the toxicity of thermolysis products and the smoke-forming ability of intumescent flame-retardant coatings for steel structures when exposed to high temperatures (fire). The results obtained indicate that fire-retardant coatings applied to structures, as well as the fire load located in a building or structure, can contribute to the overall toxicological situation in a fire and smoke formation. Studies to assess the dynamics of the yield of toxic thermolysis products, as well as to determine the smoke generation coefficient, have been carried out with respect to flame-retardant coatings that have components of different chemical nature in their composition.

Fire tests were carried out using an experimental installation when exposed to a steel sample with fire protection by an external radiation heat flow of varying intensity. The analysis of the intensity of the release of toxic thermolysis products and the smoke-forming ability was carried out from the standpoint of the relationship of the formation of a swollen insulating layer. The stages of chemical transformations in which the active formation of toxic thermolysis products such as carbon monoxide, carbon dioxide and hydrogen cyanide occurs are considered.

The study of the smoke-forming ability of intumescent coatings indicates the possibility of obtaining flame-retardant coatings with varying degrees of smoke formation (groups of smoke-forming ability D1 ... D3 according to GOST 12.1.044-89 p. 4.18), depending on the component composition and the density of the external radiation heat flux. It has been established that the chemical nature of the binder flame retardant coating makes a significant contribution to the formation of toxicants and smoke-forming ability.

Attention is drawn to the need for a comprehensive development of flame-retardant coatings, taking into account not only the standard characteristics of fire protection (viscosity, adhesion to the protected substrate, swelling coefficient, flame-retardant efficiency), but also the toxicity of thermolysis and smoke formation products.

**Keywords:** thermolysis, fire protection products, steel structures, flame-retardant bulging (intumescent) coatings, swelling, foaming, toxicity of thermolysis products, smoke-forming ability

**Введение**

Известно, что более чем в 80 % случаев причиной гибели людей на пожарах является отравление токсичными продуктами горения [1]. Опасным представляется как воздействие отдельных токсикантов

на человека, так и суммарное действие токсичных продуктов горения. Ситуация при пожаре становится для человека чрезвычайно опасной в случае действия токсичных продуктов горения в сочетании с задымленностью путей эвакуации. В дан-

ном аспекте изучение особенностей поведения различных материалов и конструкций, а также их огнезащиты в условиях высокотемпературного воздействия (пожара) является приоритетным при рассмотрении вопросов безопасности людей в зданиях и сооружениях при пожаре [1].

Прогнозирование динамики опасных факторов пожара основано на математическом моделировании. Как известно, математические модели состоят из уравнений, которые отражают всю совокупность процессов, характеризующих пожар. При моделировании учитываются такие свойства пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, концентрация выделяющихся токсичных газов, теплота сгорания, линейная скорость пламени и др. Данные параметры приведены в базе данных типовой горючей нагрузки [2], свойственной для того или иного типа здания (помещения). Очевидно, что повышенную опасность для людей в условиях пожара представляют факторы дымообразования и выделения токсичных продуктов горения при термическом разложении материалов, имеющих органическую основу.

Для повышения устойчивости зданий, сооружений, конструкций к действию высоких температур (пожара) широкое применение находят различные средства огнезащиты, среди которых наибольшую популярность имеют вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Широкое применение данных покрытий обусловлено рядом таких преимуществ, как: малая толщина и вес покрытия; относительно низкая трудоемкость при монтаже; приемлемые декоративные качества [3].

Огнезащитный механизм вспучивающихся систем основан на создании теплоизолирующего пенококсового слоя, который выступает в роли физического барьера, снижающего интенсивность процесса тепломассообмена [4]. Помимо

этого, вспученный слой препятствует проникновению окислителя к нижележащим защитным слоям покрытия. За счет содержания в рецептурах различных функциональных компонентов, огнезащитный механизм вспучивающихся покрытий также строится на процессах охлаждения, так как в результате термического разложения образуются газообразные продукты (аммиак, пары воды, оксиды углерода и т. д.), которые обеспечивают отвод значительной доли тепловой энергии [3].

Известно, что вспучивающиеся покрытия являются многокомпонентными системами, имеющими в своем составе как органические, так и неорганические компоненты. Традиционно они включают следующие функциональные компоненты: источники углеродного каркаса, газообразователи, связующие, а также различного рода наполнители.

Источники углеродного каркаса участвуют в формировании карбонизированного слоя. Считается, что эффективность действия данных компонентов зависит от числа гидроксильных групп, определяющих скорость дегидратации, и от содержания углерода, который отвечает за массу образующегося карбонизированного субстрата. Известными представителями данной группы являются полигидратные соединения. Кроме этого, во многих рецептурах вспучивающихся систем функционально необходимым является применение фосфорсодержащих неорганических и органических соединений. Данные составляющие повышают термическую устойчивость покрытия, предотвращают процессы тления, повышают адгезию, а также принимают непосредственное участие в формировании вспученного пенококсового слоя [3].

В роли газообразователей широкое применение находят органические амины, амиды (меламин, карбамид, гуанидин).

Указанные компоненты выполняют функции, связанные со вспучиванием покрытия, за счет выделения газообразных продуктов термоллиза. Действие газообразователей проявляется на стадии перехода огнезащитного покрытия из стеклообразного в вязкотекучее состояние под действием повышенной температуры.

Представителями связующих агентов являются вещества, оказывающие пластифицирующее и связывающее физико-химическое действие. Они обеспечивают адгезию покрытия к защищаемой подложке, способствуют длительному сохранению кондиции пеногенных систем, а также некоторые из них являются источниками карбонизированного слоя. Довольно часто в рецептурах интумесцентных систем используются такие связующие, как дисперсии винилацетата, эпоксидные смолы, кремнийорганические лаки, каучуковые смолы, хлорсульфированный полиэтилен и другие, а также их различные комбинации. Помимо ключевых составляющих в интумесцентных покрытиях используются наполнители, являющиеся дополнительными функциональными компонентами. В качестве таких добавок могут быть использованы различные по своей природе вещества, обладающие необходимыми свойствами. Так, например, интеркалированный графит применяется в композициях в качестве расширяющегося (вспучивающегося) при нагревании элемента [4]. Однако после процесса интумесценции вспученный слой графита может быть достаточно рыхлым, что приводит к его уносу с защищаемой поверхности. Для повышения механической прочности пенококса, как правило, используются минеральные наполнители, а также борные соединения. Кроме этого, данные компоненты способны повышать термостойкость системы, препятствуя процессу выгорания и окисления вспученного субстрата. В качестве

вспучивающихся добавок и замедлителей горения могут быть использованы также оксиды металлов. Например, гидроксиды металлов, такие как гидроксиды магния и алюминия, — выполняют функцию депрессантов дыма, а также являются компонентами, подавляющими дымообразование при термоллизе различных материалов на органической основе.

Процесс формирования вспученного пенококсового слоя огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе подавляющее количество органических соединений, сопровождается образованием различных летучих продуктов разложения, поступающих в окружающую среду, в том числе токсичных продуктов терморазложения. Очевидно, что проблема разработки и применения огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе компоненты различные по своей химической природе, должна рассматриваться с учетом их участия в формировании токсикологической и задымленной среды, опасной для жизни и здоровья человека в случае возникновения пожара.

### **Материалы и методы**

В рамках научных исследований были проведены испытания по определению динамики выделения продуктов термоллиза в результате термического воздействия на стальной образец, покрытый разработанными композициями вспучивающегося типа. Для данных целей использовалась экспериментальная установка для определения пожарной опасности материалов, позволяющая проводить экспериментальные исследования процесса термического разложения различных материалов. Экспериментальная установка ранее была неоднократно апробирована для оценки токсичности продуктов горения различных материалов [5–6].

Процесс термоллиза в камере сгорания инициируется посредством воздействия на исследуемый образец падающего

радиационного теплового потока от электронагревательного элемента. Конструктивно экспериментальная установка выполнена таким образом, что образующиеся вследствие термического разложения продукты термолитического разложения поступают в экспозиционную камеру через переходной рукав из камеры сгорания. Система контроля газовоздушной смеси в экспозиционной камере осуществляется за счет применения газоаналитического оборудования, позволяющего определять концен-

трации оксида углерода, диоксида углерода, цианистого водорода и кислорода. Экспериментальная установка предусматривает постоянное визуальное наблюдение за образцом во время испытаний с помощью смотрового окна в боковой стенке камеры сгорания. В качестве образцов использовались стальные пластины (150×150×1,5 мм) с нанесенными огнезащитными покрытиями толщиной  $1,25 \pm 0,05$  мм. Компонентный состав исследуемых огнезащитных покрытий представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные характеристики вспучивающихся огнезащитных покрытий, величина плотности внешнего радиационного теплового потока ( $q$ )

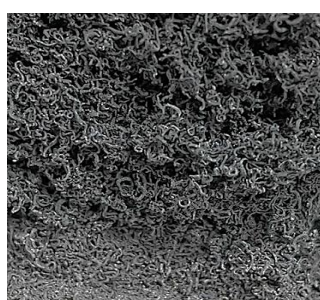
**Table 1.** Main characteristics of intumescent flame-retardant coatings, the value of the density of the external radiation heat flux ( $q$ )

№ образца No of sample	Компонентный состав (рецептура) покрытия Component composition (formulation) of the coating	$q$ , кВт/м <sup>2</sup> $q$ , kW/m <sup>2</sup>
1	Поливинилацетатная водная дисперсия – 40 %, полифосфат аммония – 14 %, интеркалированный графит – 16 %, полигидратное соединение – 6 %, N-содержащий газообразователь – 4 %, оксиды металлов – 8 %, минеральный наполнитель – 6 %, остальное – вспомогательные компоненты  Polyvinyl acetate aqueous dispersion – 40 %, ammonium polyphosphate – 14 %, intercalated graphite – 16 %, polyhydrate compound – 6 %, N-containing gas-forming agent – 4 %, metal oxides – 8 %, mineral filler – 6 %, the rest – auxiliary components	25
2	Компонентный состав аналогичен образцу № 1 The component composition is similar to sample No 1	35
3	Поливинилацетатная водная дисперсия – 40 %, полифосфат аммония – 20 %, N-содержащий газообразователь – 10 %, полигидратное соединение – 10 %, термопластичный полимер – 3 %, минеральное волокно – 4 %, оксиды металлов – 6 %, остальное – вспомогательные компоненты  Polyvinyl acetate aqueous dispersion – 40 %, ammonium polyphosphate – 20 %, N-containing gas-forming agent – 10 %, polyhydrate compound – 10 %, thermoplastic polymer – 3 %, mineral fiber – 4 %, metal oxides – 6 %, the rest – auxiliary components	25
4	Компонентный состав аналогичен образцу № 3 The component composition is similar to sample No 3	35

№ образца No of sample	Компонентный состав (рецептура) покрытия Component composition (formulation) of the coating	$q$ , кВт/м <sup>2</sup> $q$ , kW/m <sup>2</sup>
5	Смола эпоксидно-диановая (ЭД-20) – 14,0 %, отвердитель – 5,0 %, хлорорганический растворитель – 6,0%, пластификатор – 18,0 %, полифосфат аммония – 30,0 %, интеркалированный графит – 7,0 %, минеральное волокно – 2,0 %, оксиды металлов – 3,0 %, гидроксиды металлов – 12,0 %, остальное – вспомогательные компоненты Epoxy-diane resin (ED-20) – 14,0 %, hardener – 5,0 %, organochlorine solvent – 6,0 %, plasticizer – 18,0 %, ammonium polyphosphate – 30,0 %, intercalated graphite – 7,0 %, mineral fiber – 2,0 %, metal oxides – 3,0 %, metal hydroxides – 12,0 %, the rest – auxiliary components	25
6	Компонентный состав аналогичен образцу № 5 The component composition is similar to sample No 5	35

Исследуемые покрытия получены на основе известных подходов к формированию рецептурного состава вспучивающихся покрытий с применением функциональных пеногенных компонентов, а также различных минеральных, ароматических и термопластичных наполнителей. Данные покрытия были подвергнуты огневому испытанию по разработанному методу экспресс-оценки эффективности огнезащитных средств, описанной в работе [7].

Время достижения критической температуры стального образца для всех огнезащитных систем составляло не менее 30 минут в условиях более жестких (на 15–20 %), чем стандартный температурный режим пожара. Вспененные слои данных покрытий отличаются достаточно плотной структурой, без пустот и трещин, а также хорошей адгезией к защищаемой поверхности. На рис. 1 представлена структура вспученных слоев некоторых исследуемых покрытий.



а (a)



б (b)

**Рис. 1.** Фрагменты структуры вспученных слоев интумесцентных покрытий а – образец № 2; б – образец № 4

**Fig. 1.** Fragments of the structure of the expanded layers of intumescent coatings a – sample No 2; b – sample No 4

При проведении экспериментальных исследований по оценке динамики выхода продуктов термолитического разложения в результате

термического воздействия на стальной образец с огнезащитой, рассматривались два режима термического разложения,

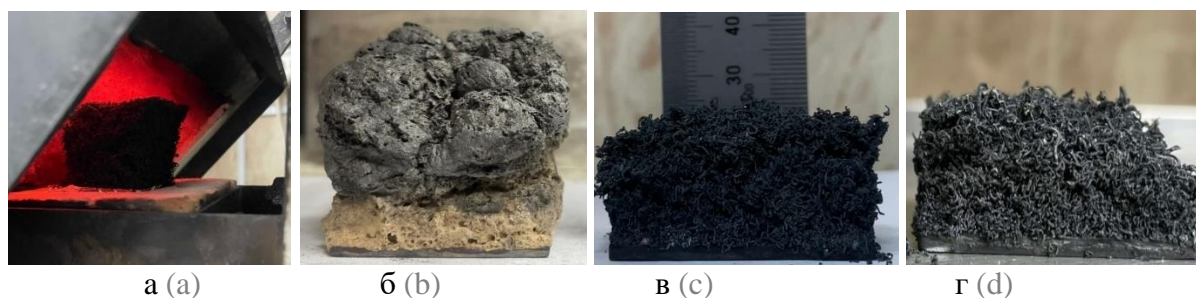


при которых величина плотности внешнего радиационного теплового потока соответствовала 25 и 35 кВт/м<sup>2</sup>. Так как объектом исследования являются интумесцентные покрытия, были выбраны такие режимы теплового воздействия, при которых происходит активация процесса вспучивания и формирование вспученного слоя (активное выделение летучих токсичных продуктов термоллиза). В условиях стандартного температурного режима пожара достижение данных значений плотности теплового потока наблюдается на 5–7 минуте от начала огневого испытания.

В работе также была исследована дымообразующая способность вспучивающихся огнезащитных покрытий в соответствии с методом экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов, описанного в ГОСТ 12.1.044-89, п. 4.18. Данный

метод описывает процесс подготовки образцов и процедуру огневых испытаний с описанием требований к измерительному оборудованию. Сущность метода определения коэффициента дымообразования заключается в определении оптической плотности дыма, образующегося при пламенном или беспламенном горении (тлении) известного количества испытуемого вещества или материала, распределенного в заданном объеме. Величина плотности внешнего радиационного теплового потока при огневых испытаниях соответствовала 25 и 35 кВт/м<sup>2</sup>.

Для испытаний были подготовлены стальные пластины (40×40×1,5 мм) с нанесенными огнезащитными покрытиями (табл. 1) толщиной  $1,25 \pm 0,05$  мм. На рис. 2 представлены некоторые из исследуемых покрытий после проведенных испытаний.



**Рис. 2.** Вспученные слои исследуемых покрытий в результате термического воздействия теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup>: а – образец № 1,  $K_{\text{ВСП}} = 40$ ; б – образец № 3,  $K_{\text{ВСП}} = 37$ ; в – образец № 5,  $K_{\text{ВСП}} = 20$ ; г – образец № 6,  $K_{\text{ВСП}} = 16$

**Fig. 2.** Swollen layers of the coatings under study as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup> (a – sample № 1,  $K_{\text{sw}} = 40$ ; b – sample № 3,  $K_{\text{sw}} = 37$ ; c – sample № 5,  $K_{\text{sw}} = 20$ ; d – sample № 6,  $K_{\text{sw}} = 16$ )

### Результаты и их обсуждение

В результате высокотемпературного воздействия на интумесцентные покрытия протекают сложные физико-химические процессы, которые приводят к образованию теплоизолирующего пенококсового слоя, формирование которого сопровождается активным поступлением

летучих продуктов в газовую фазу. Характер процесса пенообразования огнезащитного покрытия с выделением различных газообразных продуктов определяется особенностями взаимодействия химических веществ и соединений, входящих в его компонентный состав, при повышении температуры.

Традиционно основу вспучивающихся систем составляют такие компоненты, как полигидратные соединения (полиолы), газообразователи и кислотодonorный агент (полифосфат аммония, соли аммония фосфорной кислоты и т. д.). При термическом воздействии полифосфат аммония выделяет аммиак и воду в две стадии. Первая связана с процессами его плавления при 165–280 °С, а при температуре более 300 °С начинается его интенсивное разложение на аммиак, фосфорную кислоту и пары воды [8].

В ряде работ [3, 9] предполагается, что в результате термических превращений фосфорная кислота участвует в реакции этерификации с полиолом, образуя при этом эфиры. Однако в более современных работах [8, 10] отмеченные результаты не нашли своего подтверждения. В качестве полиола в данных исследованиях использовался пентаэритрит, который, как известно, является устойчивым (кристаллическим) органическим соединением. Для возможности протекания каких-либо химических реакций с участием данного компонента необходимо осуществление процесса его плавления. Анализ кривых дифференциального термического анализа пентаэритрита свидетельствует о начале процесса разрушения его кристаллической фазы при температурах в пределах 195 °С и завершении при 254 °С (оценивается по наличию характерных эндотермических пиков) [8].

В работе [10] с помощью методов термического анализа проводится исследование по изучению особенностей термического превращения вспучивающихся композиций, состоящих из полифосфата аммония, меламина и пентаэритрита в условиях динамического нагрева. Установлено, что для пентаэритрита на начальной стадии (при 195 °С) происходит переход его тетрагональной решетки в кубическую.

Далее осуществляется плавление кубической решетки и параллельное разложение пентаэритрита на формальдегид и ацетальдегид. После этого протекает реакция меламина и ацетальдегида с образованием меламиноальдегидных смол. Постоянство образования этих смол поддерживается полифосфатом аммония. Далее происходит разложение ингредиентов, выделяющих аммиак, воду и оксиды углерода. Газообразующие продукты, вспучивая вязкотекучую массу, участвуют в процессе образования термоизолирующего пеногенного слоя.

Рассматривая физико-химические процессы, происходящие при термолитизе вспучивающихся композиций, можно выделить стадию образования газообразных продуктов термолитиза. Каждый из рассмотренных выше компонентов в той или иной степени принимает участие в выделении таких продуктов. Так, например, в ходе проведения исследований летучих продуктов разложения полифосфата аммония [8] было установлено, что при температурах от 165 °С до 280 °С происходит выделение аммиака и воды. Пентаэритрит во вспучивающихся системах выполняет несколько функций [11]. Помимо того, что является источником меламиноальдегидных смол, он еще выделяет газообразные продукты термолитиза (СО, СО<sub>2</sub>) при термическом воздействии. Как уже отмечалось выше, рассматриваемые огнезащитные системы должны состоять из пенообразующих компонентов, непосредственная функция которых – вспучивание покрытия. При термическом разложении данных ингредиентов в зависимости от вида и соотношения химических компонентов можно ожидать значительное выделение оксидов углерода. Помимо этого, немалая доля образования угарного газа приходится на термическое разложение уже сформированного вспученного слоя [11].

Как уже отмечалось, существует достаточно большое количество функциональных компонентов для формирования рецептур интумесцентных покрытий. Исходя из накопленного опыта в сфере огнезащиты, сложились известные принципы подбора компонентов и их оптимальных соотношений, которые обеспечивают устойчивое формирование вспученного теплоизолирующего слоя. Так, согласно экспериментальному изучению системы полифосфат аммония — пентаэритрит — карбамид [3] (соотношение 3:1:1) авторы пришли к выводу, что газообразователь в данном случае не вносит значительного вклада в процесс вспенивания системы. Это связано с достаточно низкой температурой деструкции карбамида ( $T_{\text{дестр.}} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и, как следствие, с более поздним образованием газообразных продуктов при разложении. Для более эффективного процесса вспенивания в интумесцентных системах с карбамидом рекомендуется использовать аммоний фосфорнокислый однозамещенный, температура разложения которого составляет 110–130  $^\circ\text{C}$ . В некоторых работах [4, 12] было выявлено, что оптимальное соотношение основных компонентов во вспучивающихся си-

стемах составляет 3:1:1 (полифосфат аммония – полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь). Однако в отдельных работах встречается также соотношение 2:1:1 [13]. Помимо этого, отмечается, что для снижения температуры коксообразования вспучивающихся систем необходимо увеличить соотношение полифосфат аммония, полигидратное соединение с 3:1 до 4,2:1 [14]. Избыток полифосфата аммония в данном случае способствует термическому разложению углеродсодержащих компонентов при меньших температурах. Учитывая вышесказанное, необходимо акцентировать внимание на то, что на стадии формирования рецептур вспучивающихся систем важнейшим вопросом является не только достижение соответствующей огнезащитной эффективности покрытия, но и оценка выделения токсичных продуктов разложения и дымообразования при термолитическом разложении огнезащитных покрытий.

Анализ результатов проведенных испытаний покрытий на основе поливинилацетатной дисперсии (образцы № 1–4, табл. 1) показывает, что с увеличением потери массы испытываемых покрытий (табл. 2) повышается плотность выделяющегося диоксида углерода.

**Таблице 2.** Результаты испытаний по оценке токсичности продуктов термолитического разложения покрытий

**Table 2.** Results of tests to assess the toxicity of coating thermolysis products

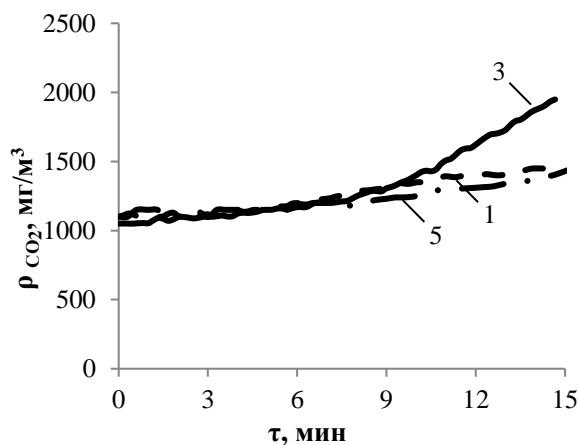
№ образца № sample	Исследуемые параметры* Investigated parameters*				
	$\tau$ , мин $\tau$ , min	$\Delta M_2$ , % $\Delta M_2$ , %	$\Delta \rho$ , мг/м <sup>3</sup> $\Delta \rho$ , mg/m <sup>3</sup>		
			CO <sub>2</sub>	CO	HCN
1	15	8,1	359	29,98	0,7
2	15	8,4	561	80,8	4,95
3	15	12,4	947	2,61	-
4	15	15,1	2459	55,05	2,89
5	15	12,5	330	40	3,4
6	15	32,0	2230	405	40,8

\*Примечание:  $\tau$  – время экспозиции, мин.;  $\Delta M_2$  – потеря массы, %;  $\Delta \rho$  – плотность выделяющихся газов, мг/м<sup>3</sup>.

\*Note:  $\tau$  – exposure time, min;  $\Delta M_2$  – mass loss, %;  $\Delta \rho$  – density of gases released, mg/m<sup>3</sup>.

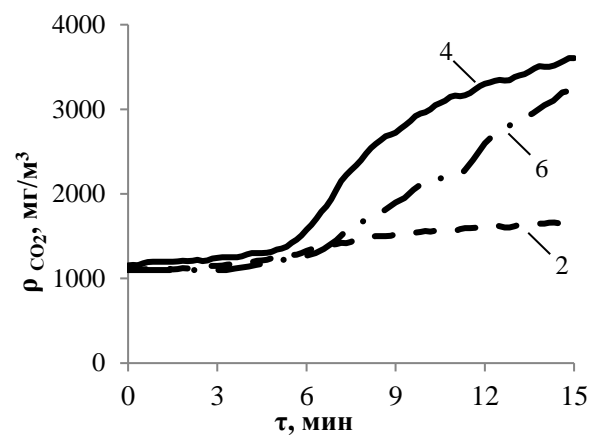
Покрытие на водной основе с классическими антипиренами и термопластичным полимером (образцы № 3, 4) характеризуется более интенсивным выделением диоксида углерода (рис. 3, 4) по сравнению с покрытием на водной основе с ана-

логичными антипиренами и интеркалированным графитом (образцы № 1, 2). Однако, при испытании покрытия (образцы № 1, 2) формируется большее количество монооксида углерода СО (рис. 5, 6), а также цианистого водорода HCN (рис. 7, 8).



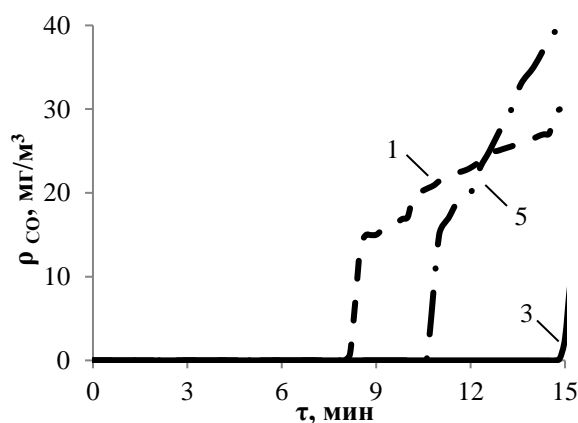
**Рис. 3.** Зависимость плотности образующегося CO<sub>2</sub> от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 3.** Dependence of the density of the formed CO<sub>2</sub> on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup>

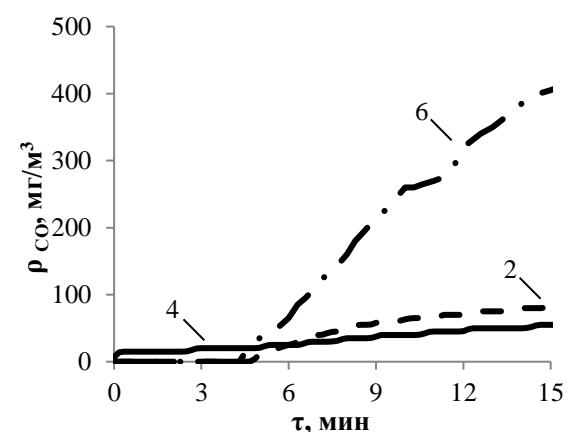


**Рис. 4.** Зависимость плотности образующегося CO<sub>2</sub> от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 4.** Dependence of the density of the formed CO<sub>2</sub> on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m<sup>2</sup>

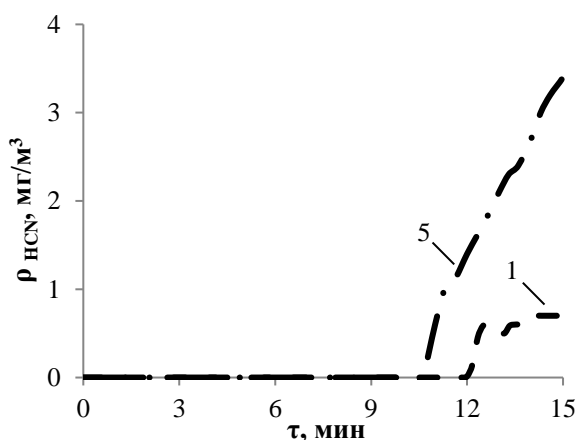


**Рис. 5.** Зависимость плотности образующегося СО от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup>



**Рис. 6.** Зависимость плотности образующегося СО от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 5.** Dependence of the density of the formed CO on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup>

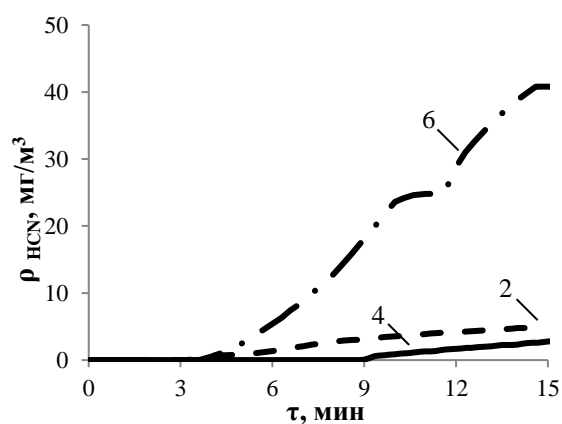


**Рис. 7.** Зависимость плотности образующегося HCN от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 7.** Dependence of the density of the formed HCN on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup>

Известно, что циановодород выделяется в результате термолитического разложения азотсодержащих материалов в период формирования вспученного слоя [1]. Анализ кривых зависимости плотности образующегося циановодорода от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 8), показывает, что повышенные значения показателя плотности HCN покрытий № 2 и № 4 приходятся на стадию активации процесса вспучивания. Температура вспучивания данного состава равна 360 °С, тогда как температура вспучивания покрытия № 4 составляет 430 °С. В момент формирования пеногенного субстрата покрытия № 2 (уже на 3–4 минуте) зафиксировано выделение цианистого водорода (рис. 8). Образование HCN при термолитическом разложении покрытия № 4 соответствует 9 минуте экспозиции. При

**Fig. 6.** Dependence of the density of the formed CO on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m<sup>2</sup>



**Рис. 8.** Зависимость плотности образующегося HCN от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 7.** Dependence of the density of the formed HCN on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m<sup>2</sup>

анализе дальнейшей динамики выделения цианистого водорода (более 9 минут от начала испытания) наблюдается аналогичный характер кривых №2 и 4, что указывает на сопоставимые скорости выделения данного токсиканта при термолитическом разложении данных покрытий (скорость выделения HCN покрытия № 2 в данном промежутке времени соответствует 0,31 мг/(м<sup>3</sup>·мин) а скорость выделения HCN покрытия № 4 – 0,45 мг/(м<sup>3</sup>·мин).

Опираясь на данные, представленные в табл. 1, можно предположить, что повышенный выход углекислого газа в результате термического разложения покрытия на основе классических антипиренов и термопластичного полимера (образец № 3, 4) напрямую связан с повышенным содержанием таких компонентов, как полигидратное соединение и N-содержащий газообразователь [11]. В рецептуре

покрытий 1, 2, при соотношении полифосфат аммония полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь (3,5:1,5:1) массовая доля данных компонентов ниже в сравнении с рецептурой покрытия (образцы № 3, 4); соотношение полифосфат аммония – полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь составляет 2:1:1). Тогда как повышенный выход угарного газа при термоллизе покрытий № 1, 2 связан с содержанием в рецептуре дополнительного наполнителя – интеркалированного графита, роль которого обусловлена формированием структуры пенококса, а также более ранней активацией процесса вспучивания [12].

Данные предположения основываются на полученных результатах и визуальных наблюдениях в ходе проведения испытаний, которые заключаются в том, что углекислый газ выделяется в процессе формирования вспученного слоя, а угарный газ начинает образовываться

в момент уже сформированного углеродного каркаса, то есть при неполном сгорании углеродсодержащего вещества.

При анализе рис. 9 видно, что пенококсый слой покрытия № 3 начал образовываться уже на заключительной стадии испытания. Зависимость плотности образующегося монооксида углерода от времени экспозиции (рис. 5) также свидетельствует о выделении угарного газа на заключительной стадии испытания в момент начала вспучивания покрытия. Тогда как при испытании покрытия № 1 наблюдается эффект более раннего вспенивания (рис. 10).

Фактический объем выделяющегося монооксида углерода при термическом воздействии плотностью теплового потока  $25 \text{ кВт/м}^2$  на покрытие № 1, в сравнении с выходом CO при термоллизе покрытия № 3, увеличился более чем в 10 раз (табл. 2).



**Рис. 9.** Вспученный слой покрытия № 3 в результате термического воздействия теплового потока плотностью  $25 \text{ кВт/м}^2$

**Fig. 9.** The expanded coating layer No 3 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of  $25 \text{ kW/m}^2$



**Рис. 10.** Вспученный слой покрытия № 1 в результате термического воздействия теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup> (коэффициент вспучивания –  $K_{всп} = 28$ )

**Fig. 10.** The expanded coating layer No 1 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup> (swelling coefficient –  $K_{sw} = 28$ )

В рамках проведенных испытаний было также исследовано покрытие, имеющее в своем составе связующее на основе эпоксидной смолы (образцы № 5, № 6).

Известно, что эпоксидные смолы обладают повышенной пожарной опасностью [15]. Так, при исследовании дымообразующей способности полимерраствора на основе эпоксидной смолы, отвержденного полиэтиленполиамином (ПЭПА), коэффициент дымообразования составлял около 1000 м<sup>2</sup>/кг [16]. Отмечается, что снижение горючести и дымообразующей способности эпоксидных полимеров достигается путем добавления в компонентный

состав минеральных наполнителей. Кроме того, известно, что на начальных стадиях термолитиза отвержденных эпоксидных смол происходит разрыв полимерных цепей [15]. При протекании данных реакций наблюдается выделение угарного газа, формальдегида, метана, ацетона и др.

Исследуемая композиция на основе эпоксидной смолы характеризуется меньшей толщиной вспучивания, в сравнении с другими испытываемыми образцами (рис. 11).



**Рис. 11.** Вспученный слой покрытия № 6 в результате термического воздействия теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup> ( $K_{всп} = 16$ )

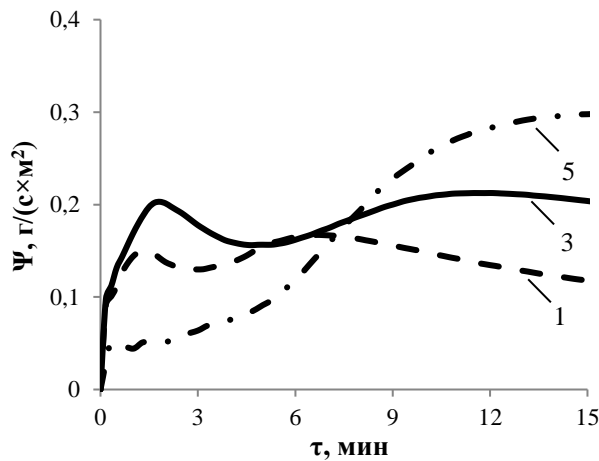
**Fig. 11.** The expanded coating layer No 6 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 35 kW/m<sup>2</sup> ( $K_{sw} = 16$ )

При этом наблюдается значительная потеря массы покрытия – от 12,5 до 32,0 % (табл. 2), которая сопровождается достаточно высокой плотностью выделяющегося монооксида углерода и цианистого водорода в экспозиционной камере (при 25 кВт/м<sup>2</sup> – 40 и 3,4 мг/м<sup>3</sup>; при 35 кВт/м<sup>2</sup> – 405 и 40,8 мг/м<sup>3</sup> соответственно). Необходимо отметить, что при замене связующего на основе поливинилацетатной дисперсии на связующее с эпоксидной смолой в несколько раз увеличивается выход СО и HCN (табл. 2, рис. 5–8). Кроме этого, необходимо отметить, что при анализе полученных результатов для огнезащитных покрытий (№ 5, 6) зафиксирована следующая особенность: временной показатель выделения монооксида углерода при термическом воздействии плотностью теплового потока 25 кВт/м<sup>2</sup> идентичен моменту выделения цианистого водорода. Аналогичная ситуация наблюдается и при тепловом потоке плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup>. Это указывает на реализацию совместного (суммарного) эффекта выделения указанных токсичных продуктов термолитиза, что значительно повысит степень токсикологического воздействия на организм человека при пожаре [1].

Представляет интерес сравнительный анализ данных по выходу токсичных продуктов термолитиза и значению массовой скорости выгорания испытуемых образцов огнезащитных покрытий (рис. 12–13). Из результатов, представленных на рис. 12-13 видно, что при повышении плот-

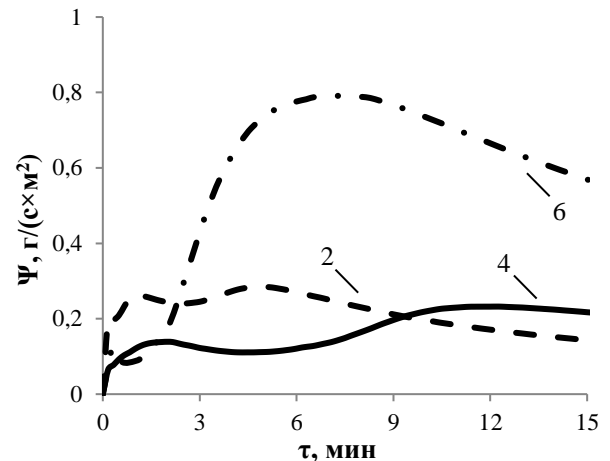
ности теплового потока происходит повышение значений массовой скорости выгорания непосредственно образцов покрытий в 1,5-2 раза, учитывая инертность подложки в виде стального образца. При повышении плотности внешнего теплового потока происходит более ранний процесс вспучивания покрытий, что отражается на выходе токсичных продуктов термолитиза различных покрытий (рис. 3–8). В большинстве случаев просматривается 2-х стадийность процесса потери массы покрытий независимо от природы и соотношений компонентов огнезащитных покрытий. Менее выражена 2-стадийность процесса для огнезащитных покрытий, имеющих в качестве связующего эпоксидную смолу, обусловленная высокими скоростями выгорания данного покрытия с выделением различных токсикантов, особенно при плотности теплового потока 35 кВт/м<sup>2</sup>. Наиболее важным является установление значений массовой скорости выгорания для стадии образования и формирования вспученного слоя покрытия. Во всех случаях характерные максимальные пики массовой скорости выгорания покрытия связаны с началом процесса вспучивания покрытий и выходом токсикантов СО и СО<sub>2</sub>. В особенности это связано с покрытиями, имеющими в качестве связующего поливинилацетатную дисперсию. Для покрытий, имеющих в своем составе эпоксидную смолу, заметное повышение массовой скорости выгорания наблюдается в момент выделения цианистого водорода (рис. 7, 8).





**Рис. 12.** Зависимость удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 12.** Dependence of the specific mass rate of burnout on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m<sup>2</sup>



**Рис. 13.** Зависимость удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м<sup>2</sup>

**Fig. 13.** Dependence of the specific mass rate of burnout on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m<sup>2</sup>

Полученные зависимости удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции образцов косвенно отражают важнейший показатель скорости тепловыделения в условиях процесса терморазложения покрытий. Для выяснения особенностей процесса терморазложения покрытий с соответствующим компонентным составом с позиций экзо- и эндотермичности протекающих реакций необходимо продолжить исследования с использованием calorиметрических методов и методов термического анализа.

В работе также была исследована дымообразующая способность вспучивающихся огнезащитных покрытий в соответствии с методом экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов. Опираясь на полученные результаты, необходимо отметить, что покрытия, как на основе эпоксидной смолы, так и с использованием поливинилацетатного водного связующего, принимают участие в дымообразовании при их термическом раз-

ложении. Причем некоторые из исследуемых покрытий следует отнести к группе ДЗ (с высокой дымообразующей способностью, табл. 3).

В ходе испытаний был зафиксирован достаточно высокий коэффициент дымообразования образцов покрытий № 5 и 6 (895 и 887 м<sup>2</sup>/кг соответственно), что объясняется повышенной пожарной опасностью используемого связующего в рецептуре указанных покрытий. Образцы № 1–4, содержащие в своем составе водную поливинилацетатную дисперсию, характеризуются следующими показателями коэффициента дымообразования: при 25 кВт/м<sup>2</sup> – 33 и 54 м<sup>2</sup>/кг, а при 35 кВт/м<sup>2</sup> – 64 и 114 м<sup>2</sup>/кг. Полученные результаты показывают, что природа химических компонентов, в частности связующих, оказывает непосредственное влияние на дымообразующую способность при термолитическом разложении огнезащитных вспучивающихся систем.

**Таблица 3.** Результаты испытаний по определению коэффициента дымообразования  
**Table 3.** Test results for determining the smoke generation coefficient

№ образца No of sample	Величина плотности воз- действующего теплового потока, кВт/м <sup>2</sup> The value of the density of the impacting heat flow, kW/m <sup>2</sup>	Коэффициент дымооб- разования, м <sup>2</sup> /кг Smoke generation coefficient, m <sup>2</sup> /kg	Группа по дымообразу- ющей способности Smoke-forming capacity group
1	25	54	Д2
2	35	114	Д2
3	25	33	Д1
4	35	65	Д2
5	25	895	Д3
6	35	887	Д3

### Заключение

В работе представлены результаты исследований по оценке динамики выхода продуктов термического разложения, а также дымообразующей способности в результате термолиза вспучивающихся огнезащитных систем для стальных строительных конструкций. В составе исследуемых покрытий использовались как традиционные компоненты, так и вспомогательные компоненты, имеющие минеральную, ароматическую и термопластичную природу [12]. На основании данных исследований авторы приходят к выводу, что огнезащитные составы, нанесенные на стальные конструкции объекта, в котором происходит пожар, могут вносить определенный вклад в изменение общей токсикологической картины, а также в дымообразование, что, несомненно, может оказать влияние на безопасность людей при пожаре.

В результате проведенных испытаний было выявлено, что основными источниками дыма, а также токсичных продуктов термолиза в составе вспучивающихся покрытий являются такие группы компонентов, как: связующие, кислотные катализаторы и газообразователи. Исключить

данные элементы из состава интумесцентных покрытий не представляется возможным, так как они являются основными участниками процесса вспенивания покрытий. Представленный анализ результатов испытаний в настоящей работе позволяет сделать важный вывод о том, что путем изменения компонентного состава, массовой доли содержащихся веществ в рецептурах вспучивающихся огнезащитных систем и их соотношений можно достичь снижения рассматриваемых показателей пожарной опасности интумесцентных покрытий с учетом сохранения эффективности покрытия. Так, например, динамика выделения монооксида углерода может регулироваться посредством изменения температуры активации процесса вспучивания интумесцентной композиции. При добавлении в состав вспучивающегося покрытия интеркалированного графита, выступающего в качестве одного из основных вспенивающих агентов, удастся снизить температуру активации процесса вспенивания на 70 °С. При этом наблюдается снижение плотности СО внутри экспозиционной камеры на 55 и 91 % в зависимости от плотности внешнего теплового потока.

Различный выход углекислого газа при термоллизе вспучивающихся покрытий может быть связан с изменением содержания компонентов, участвующих в формировании пенококсового слоя. Так, при уменьшении массовой доли таких составляющих, как полигидратное соединение, N-содержащий газообразователь (на 4–6 %) удалось снизить показатель плотности выделяющегося диоксида углерода внутри экспозиционной камеры фактически в 2,6–4,3 раза в зависимости от величины плотности теплового потока. При этом показатель плотности монооксида углерода возрастает в пределах от 1,5 до 11,5 раз, а синильной кислоты – в 1,7 раз.

Необходимо отметить, что природа связующего оказывает значительное влияние на токсикологическую обстановку и дымообразующую способность при термоллизе вспучивающихся покрытий. Так, при исследовании покрытия, имеющего в своем составе эпоксидную смолу, было зафиксировано фактическое повышение плотности выделяющихся продуктов термоллиза (монооксида углерода, цианистого водорода) в некоторых случаях до 15 раз, при сравнении с продуктами термоллиза покрытий на основе поливинилацетатной дисперсии с фактически идентичным составом наполнителей.

Помимо этого, в результате проведенных испытаний наблюдалось увеличение коэффициента дымообразования.

Группа дымообразующей способности покрытия, содержащего в своем составе эпоксидную смолу, соответствует Д3 (с высокой дымообразующей способностью) вне зависимости от величины плотности внешнего радиационного теплового потока (коэффициент дымообразования при 25 кВт/м<sup>2</sup> составил 895 м<sup>2</sup>/кг, а при 35 кВт/м<sup>2</sup> – 887 м<sup>2</sup>/кг), тогда как коэффициент дымообразования покрытий на основе дисперсии поливинилацетата на порядок ниже (от 33 м<sup>2</sup>/кг до 114 м<sup>2</sup>/кг в зависимости от величины плотности внешнего радиационного теплового потока) и относится к группам Д1 и Д2.

По мнению авторов, необходима комплексная разработка рецептур вспучивающихся огнезащитных систем для стальных конструкций с учетом рекомендаций, приведенных в настоящей работе. Данный подход позволяет снизить показатель плотности выделяющихся продуктов термоллиза в условиях пожара, а также значение коэффициента дымообразования.

В рамках дальнейших научных исследований предлагается оригинальное решение, которое заключается в повышении эффективности огнезащиты и снижения их пожароопасных характеристик не только применением соответствующего компонентного состава в сбалансированном виде, но и путем применения комбинаций огнезащитных вспучивающихся покрытий для стальных конструкций [17].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С. В., Доан В. М., Нгуен Т. Д. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении : монография. М, 2017. 130 с.
2. Кошмаров Ю. А., Пузач С. В., Андреев В. В. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М., 2012. 126 с.
3. Халтуринский Н. А., Крупкин В. Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36.
4. Зыбина О. А., Варламов А. В., Мнацаканов С. С. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных покрытий : монография. Новосибирск, 2010. 50 с.
5. Болдрушкиев О. Б., Пузач С. В., Косьянова Е. Н. Определение показателя токсичности при воздействии циановодорода на организм человека при пожарах : материалы междунар. научн.-практич. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 178–185.

6. Пузач С. В., Болдрушкиев О. Б., Сулейкин Е. В. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 2. С. 39–46.
7. Мельдер Е. В., Сивенков А. Б. Синергизм комбинированных интумесцентных систем для огнезащиты стальных конструкций // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология : сб. материалов конф. Энгельс : СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2022. С. 36–40.
8. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов: дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2015. 260 с.
9. Duquesne S., Le Bras M., Delobel R., Camino G., Gengembre L. X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of the Ammonium Polyphosphate-Polyurethane System used as Fire-Retardant Additive in EVA // Journal of Fire Sciences. 2003. Vol. 21. No. 2. P. 89-115. DOI:10.1177/0734904103021002001
10. Чернова Н. С. Химические превращения и механизм огнезащитного действия вспучивающихся композиций: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 132 с.
11. Ненахов С. А., Пименова В. П. Физико-химия вспениваемых огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58.
12. Ненахов С. А., Пименова В. П., Натейкина Л. И. Влияние наполнителей на структуру пенококка на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18. № 7. С. 51–58.
13. Lucherini, A., Maluk, C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. P. 105712. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105712
14. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония — пентаэритрит в интумесцентных системах / Т. А. Рудакова и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 3. С. 24–31.
15. Эпоксидные связующие для создания труднгорючих и пожаробезопасных полимерных композиционных материалов / Т. А. Гребенева и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 11. С. 14–23.
16. Термостойкость и пожарная опасность эпоксидных полимеррастворов / Ушков В. А. и др. // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 68–71.
17. Мельдер Е. В., Сивенков А. Б. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 49–65.

#### References

1. Puzach S.V., Doan V.M., Nguyen T.D. Education, distribution and human exposure to toxic combustion products in a fire in a room. Monograph. M.: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. 130 p. (rus).
2. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V. Forecasting of dangerous factors of fire in the room. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2012; 126. (rus).
3. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation// Fire and Explosion Safety. 2011; 10: 33–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
4. Zyбина O.A., Varlamov A.V., Mnatsakanov S.S. Problems of technology of coke-forming flame-retardant coatings. Monograph, Novosibirsk: SIBPRINT, 2010. 50. (rus).
5. Boldrushkiev O.B., Puzach S.V., Kosyanova Y.N. Determination of the toxicity index when exposed cyanide on the human body during fires. Materials of the X International scientific and practical conference of young scientists and specialists "Problems of technosphere safety - 2021". Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 178–185. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46136082> (rus).
6. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Suleikin E.V. A new approach to determining the toxicity index under the joint impact of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire in the room. Fires and emergencies: prevention, elimination. 2021; 2: 39–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46355472> (rus).
7. Melder E.V., Sivenkov A.B. Relevance of research and development of combinations of intumescent flame retardant coatings. Collection of materials of the IX International Conference "Composite-2022". Engels: THESE (branch) of the Gagarin State Technical University named after Yu.A., 2022; 36–40. (rus).
8. Zyбина O.A. Theoretical principles and technology of flame-retardant swelling materials: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.17.06 – St. Petersburg, 2015. (rus).
9. Duquesne S., Le Bras M., Delobel R., Samipo G., Gengembre L. X-ray photoelectron spectroscopy study of the ammonium polyphosphate-polyurethane system used as fire-retardant additive in EVA. Journal of Fire Sciences. 2003; 2: 89–115. DOI:10.1177/0734904103021002001.

10. Chernova N.S. Chemical transformations and the mechanism of flame-retardant action of swelling compositions: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.17.06 – St. Petersburg, 2010. (rus).
11. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature). Fire and explosion safety. 2010; 8: 11–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus).
12. Nenakhov S.A., Pimenova V.P., Nateikina L.I. Influence of fillers on the structure of foam coke based on ammonium polyphosphate. Fire and explosion safety. 2009; 7: 51–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12869649> (rus).
13. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. Journal of Constructional Steel Research. 2019; 162: 105712. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105712.
14. Rudakova T.A., Yevtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Batrakov A.A. Ways of reducing the temperature of foaming in the system ammonium polyphosphate - pentaerythritol in intumescent systems. Fire and explosion safety. 2015; 3: 24–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23491404> (rus).
15. Grebeneva T.A., Chursova L.V., Panina N.N., Orlov A.V., Epoxy binders for creation of flame-retardant and fireproof polymer composite materials // Production and scientific-technical journal "All materials. Encyclopedic reference book". 2022; 14–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49794853> (rus).
16. Ushkov V.A., Abramov V.V., Grigorieva L.S., Kiryanova L.V. Heat resistance and fire hazard of epoxy polymer solutions. Building materials. 2011; 12: 68–71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17304868> (rus).
17. Melder E.V., Sivenkov A.B. The effectiveness of the combination of flame-retardant intumescent coatings for steel constructions. Scientific online journal "Technosphere safety technologies". 2022; 1: 49–65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. (rus).

#### Информация об авторах

**Мельдер Егор Владимирович**, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; ORCID 0000-0002-4658-393X; РИНЦ ID 1124775; e-mail: [gokamel@yandex.ru](mailto:gokamel@yandex.ru)

**Сивенков Андрей Борисович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; ORCID 0000-0003-3821-8606; РИНЦ ID: 434522; Scopus Author ID 57204498793; e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

**Злобнов Петр Викторович**, заместитель начальника учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, начальник научно-исследовательского отдела проблем профилактики объектов защиты, Академия ГПС МЧС России, Россия,

#### Information about the authors

**Egor V. Melder**, Adjunct of the Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4658-393X; ID RISC 1124775; e-mail: [gokamel@yandex.ru](mailto:gokamel@yandex.ru)

**Andrey B. Sivenkov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety in Construction (as part of the educational and scientific complex of Fire safety of objects of Protection), SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0003; ID RISC: 434522; Scopus Author ID 57204498793; e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

**Peter V. Zlobnov**, Deputy Head of the educational and scientific complex of fire safety of objects of protection - Head of the Research Department of problems of prevention of objects of protection, SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St.,

129366, г. Москва, улица Бориса 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID  
Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 766876; RISC: 766876; e-mail: [zlobnov70@mail.ru](mailto:zlobnov70@mail.ru)  
e-mail: [zlobnov70@mail.ru](mailto:zlobnov70@mail.ru)

УДК 614.841.48

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ГОРОДСКОМ ПАССАЖИРСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

Минкин Денис Юрьевич, Кубанов Ибрагим Наурузович

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Литий-ионная технология является предпочтительной электрохимической технологией накопления энергии для всё большего числа отраслей промышленности, начиная от небольших элементов в бытовой электронике и заканчивая крупномасштабными блоками для электрификации автомобильного транспорта и интеллектуальных сетей.

Высокая удельная энергия, мощность, длительный срок службы и снижение производственных затрат делают ЛИА ключевым фактором устойчивой мобильности возобновляемых источников энергии. В различных отраслях экономики технология ЛИА развивается высокими темпами, поэтому среди специалистов все еще не сложилось единого научно обоснованного мнения о том, какие должны быть установлены требования к производительности систем с точки зрения пожарной безопасности и какой методический подход даст полное описание процедуры проведения испытаний ЛИА на определение показателей пожарной опасности.

Большинство стандартов и правил устанавливают условия испытаний, вытекающие из правил для транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, и поэтому не являются репрезентативными для отказов ЛИА в полевых условиях. Несмотря на то, что дорожно-транспортные происшествия являются динамическими событиями, испытания, описанные в соответствующих стандартах, проводятся на уровне компонентов с использованием статических сборок. Эти отрасли требуют дополнительного анализа и оценки данных, характерных для электрифицированных силовых агрегатов, и добавления соответствующих тестов, таких как опасность низких температур, воспламеняемость, токсичность, опрокидывание, падение.

**Ключевые слова:** электротранспорт, пассажирский электротранспорт, литий-ионные аккумуляторные батареи, троллейбус с увеличенным ходом, электробус, экологическая безопасность

## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE FIRE SAFETY OF LITHIUM-ION BATTERIES USED IN URBAN PASSENGER ELECTRIC TRANSPORT

Denis. Y. Minkin, Ibragim. N. Kubanov

Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

## ABSTRACT

Lithium-ion technology is the electrochemical energy storage technology of choice for an expanding number of industries, ranging from small household appliances to large-scale blocks for vehicle electrification and intelligent network.

High energy density, power, long service life and lower production costs make LIB a key factor in the sustainable mobility of renewable energy sources. In various sectors of the economy, LIB technology is developing at a high pace. Thus, there is still no unified scientifically based opinion among specialists as to what system performance requirements should be set in terms of fire safety and what methodological approach will provide a complete description of the procedure for testing LIB at determination of indicators of fire danger.

The majority of the standards and regulations establish test conditions that follow from the regulations for vehicles with internal combustion engines. As a result, they are not representative of LIB failures in the field. Despite crashes being dynamic events, the tests described in the relevant standards are carried out at the component level using static assemblies. These industries require additional analysis and evaluation of data specific to electrified powertrains and the addition of appropriate tests such as low temperature hazard, flammability, toxicity, rollover, drop.

**Keywords:** electric transport, passenger electric transport, lithium-ion batteries, extended range trolleybus, electric bus, environmental safety

## Введение

На сегодняшний день электроэнергия в качестве тяги транспортных средств широко используется на различных видах воздушного, железнодорожного, морского, и автомобильного транспорта, в том числе на различных средствах индивидуальной мобильности (далее – транспортных средств). Для обслуживания пассажирских перевозок, по ряду экологических и социально-экономических причин, производитель транспортных средств, все больше делает выбор в пользу применения аккумуляторных батареи повышенной мощности. По своим характеристикам чаще всего используют ЛИА, которые уже нашли широкое применение практически во всех отраслях экономики. Стоит отметить, что в 2019 году за разработку литий-ионных батарей была вручена Нобелевская премия по химии [1].

Применение ЛИА увеличило автономный ход и мобильность электротранспорта. Городской пассажирский транспорт характеризуется нахождением в нем одновременно большого количества людей, и, соответственно, к нему должны предъявляться повышенные требования к мерам пожарной безопасности. Большая энергоемкость и наличие опасных для здоровья человека химических элементов делает ЛИА источником большой потенциальной опасности. Хотя пожары ЛИА являются статистически редкими, они представляют опасность, которая значительно отличается от других опасных пожаров с точки зрения пути возникновения, скорости распространения, продолжительности, токсичности и тушения.

В современном мире существует огромное множество различных типов аккумуляторных батарей, но далеко не все



подходят для ежедневного их использования в качестве постоянного источника тока на электротранспорте.

В троллейбусах с увеличенным автономным ходом (далее – ТУАХ) и электробусах наиболее часто используют ЛИА различных модификаций ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$ , LiNMC, Li-Pol).

Литий, применяемый в качестве энергоносителя ЛИА, является активным щелочным металлом, что и обуславливает его высокую пожаровзрывоопасность.

В проведенном авторами анализе практики применения ЛИА в городском пассажирском электротранспорте, представлены возможные причины возникновения аварийных ситуаций, в т. ч. – пожара в ЛИА [2].

Аварийные режимы ЛИА могут привести к экзотермическим реакциям и, как следствие, повышению температуры выше предельно допустимой. Совокупность этих факторов может служить причиной возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, вследствие которых может быть нанесён вред жизни и здоровью людей как во время движения транспорта, так и при его техническом обслуживании. Причем режим технического обслуживания с точки зрения пожарной опасности особенно важен, так как значительное количество техники с ЛИА может одновременно находиться в закрытых помещениях троллейбусного парка [2,3].

#### **Методика проведения эксперимента**

Влияние особенностей конструкций ТУАХ на возможные пожароопасные ситуации дает основание полагать, что существует необходимость разработки специальных методик описания и проведения испытаний ЛИА с точки зрения пожарной безопасности, включающая в себя элементы риск-ориентированного моделирования различных пожароопасных ситуаций и наличие мощного и химически опасного

источника питания (пожарной нагрузки) [4].

Большинство стандартов и правил устанавливают условия испытаний, вытекающие из правил для транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, и поэтому не являются репрезентативными для отказов ЛИА в полевых условиях (ГОСТ Р МЭК 60086-4-2009 и т. д.). Несмотря на то, что дорожно-транспортные происшествия являются динамическими событиями, испытания, описанные в соответствующих стандартах, проводятся на уровне компонентов с использованием статических сборок [5]. Эти отрасли требуют дополнительного анализа и оценки данных, характерных для электрифицированных силовых агрегатов, и добавления соответствующих тестов, таких как опасность низких температур, воспламеняемость, токсичность, опрокидывание, падение, и внесение их в новые разрабатываемые стандарты.

В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» [6] проводились подобные испытания на пожаровзрывобезопасность отечественных призматических ЛИА, предназначенных для космической отрасли. ЛИА являются одной из составных частей системы электроснабжения космических аппаратов, и поэтому их энергоёмкие и ресурсные характеристики во многом определяют показатели эффективности применения космических аппаратов. Условия работы батареи в космосе существенно отличаются от работы в наземных условиях и в авиации: батарея не допускает ремонта или замены в период эксплуатации, работает в условиях космического вакуума, что существенно изменяет ее тепловой режим.

Испытаниям подвергались литий-ионные аккумуляторы призматической формы: ЛИКГП-50С (ОАО АК «Ригель», г. Санкт-Петербург) и ICNP 30/133/207/HE

(ОАО «НИИЭИ», г. Электроугли). При проведении испытаний на стойкость к возгоранию и взрыву при ударном воздействии металлическим пробойником использовалась установка для испытания аккумуляторов на пробой с энергией в ударе до 120 Дж, достаточной для протыкания насквозь аккумуляторов толщиной до 60 мм (толщина стального корпуса 0,6 мм) [7, 8].

В 2022 году на базе Научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (далее – НИИПИ)

совместно с ГУП «Горэлектротранс» (г. Санкт-Петербург) была проведена работа по оценке ЛИА, применяемых в городском электротранспорте (троллейбусы с УАХ), по их пожаробезопасному использованию в различных циклах эксплуатации [9].

Программа проведения испытаний, моделирующих сценарии повреждения литий-ионных аккумуляторов в периоды эксплуатации (движения) и технического обслуживания объектов транспорта, включала в себя исследование двух видов аккумуляторов (рис. 1).



а (a)



б (b)

**Рис. 1.** Виды аккумуляторов: а – «Лиотех» аккумулятор LT-LFP170B «Энер Зэт», б – аккумулятор EnerDel

Fig. 1 Types of batteries: а – "Liotech" Battery LT-LFP170B "Ener Zet", б – Battery EnerDel

В отличие от испытаний, предусмотренных ГОСТ Р МЭК 62281- 2007 и т. д., в программу были включены испытания, моделирующие чрезвычайные ситуации, которые могут случиться с общественным электротранспортом во всех циклах его функционирования и обслуживания.

В соответствии с программой [10] испытаний, были смоделированы следующие виды повреждений (рис. 2):

- розлив и воспламенение бензина под отсеком аккумуляторной батареи при дорожно-транспортном происшествии;

- перегрев аккумуляторных батарей при выходе из строя системы кондиционирования;

- имитация короткого замыкания аккумуляторных батарей в ходе движения автотранспорта;

- повреждения, полученные при падении с высоты;

- перезаряд аккумуляторных батарей;

- воздействие на аккумуляторные батареи внешних источников тепла (фрикционных искр) [11].

### Результаты эксперимента и их анализ

В течение всего времени испытания наблюдалось вспучивание аккумуляторов, выделение горючих газов при высыхании сепаратора, что приводило к замыканию

анода и катода аккумулятора – происходило резкое увеличение скорости экзотермических реакций, взрывных процессов не наблюдалось. Графики роста температуры и теплового потока приведены на (рис.3).



а (a)



б (b)



в (c)



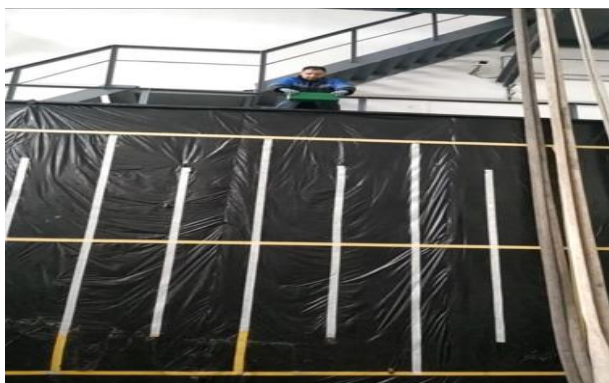
г (d)



д (e)



е (f)



ж (g)



з (h)



и (i)



к (j)



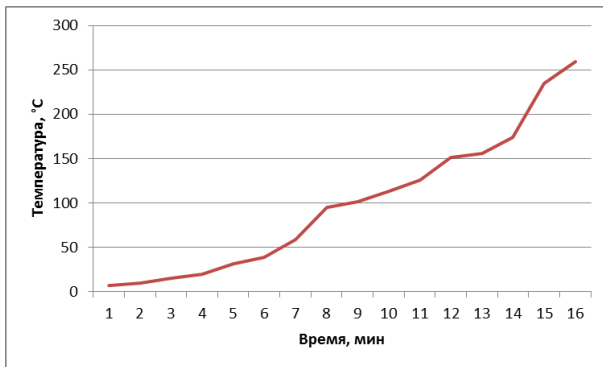
л (k)



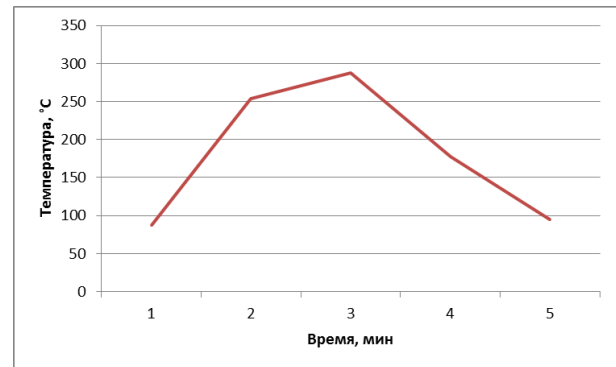
м (l)

**Рис. 2.** Проведение испытаний ЛИА: а – LT-LFP170В; б – EnerDel (при розливе бензина); в – LT-LFP170В; г – EnerDel (при перегреве); д – LT-LFP170В; е – EnerDel (при коротком замыкании); ж – LT-LFP170В; з – EnerDel (при падении с высоты); и – LT-LFP170В; к – EnerDel (при перезарядке); л – LT-LFP170В; м – EnerDel (при воздействии внешних источников тепла)

**Fig. 3** Testing of LIA: a - LT-LFP170В; b – EnerDel (when filling gasoline); c - LT-LFP170В; d – EnerDel (when overheating); e - LT-LFP170В; f – EnerDel (when short-circuiting); g - LT-LFP170В; h – EnerDel (when falling from a height); i - LT-LFP170В; j – EnerDel (when recharging); k - LT-LFP170В; l – EnerDel (when exposed to external heat sources)



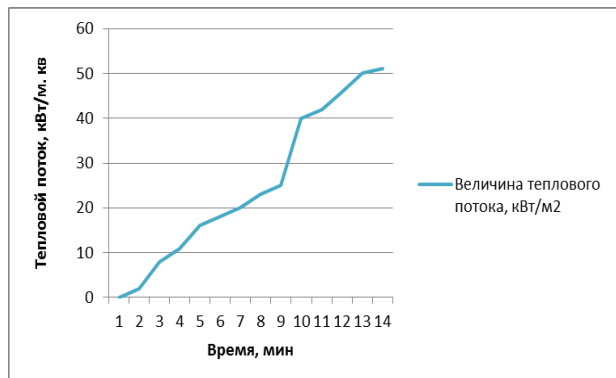
а (a)



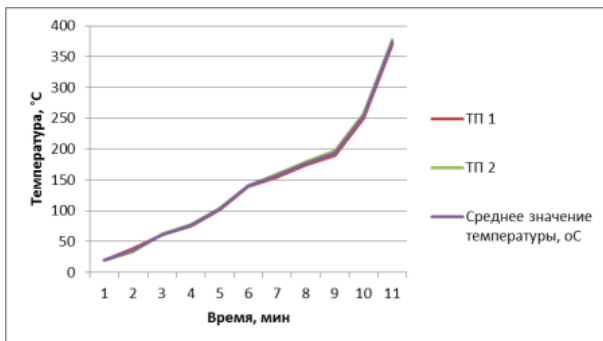
б (b)



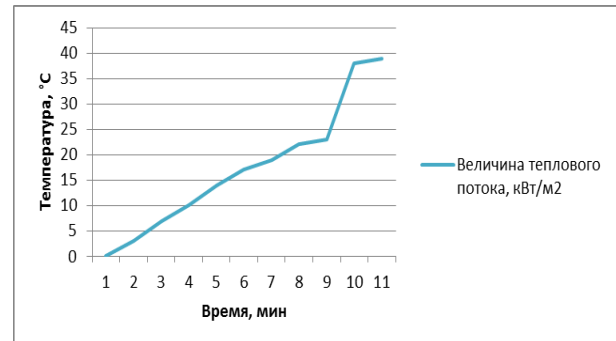
в (c)



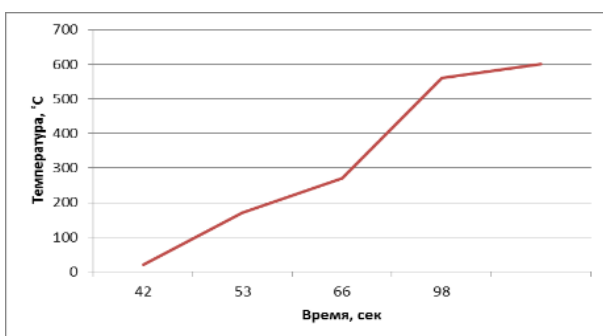
г (d)



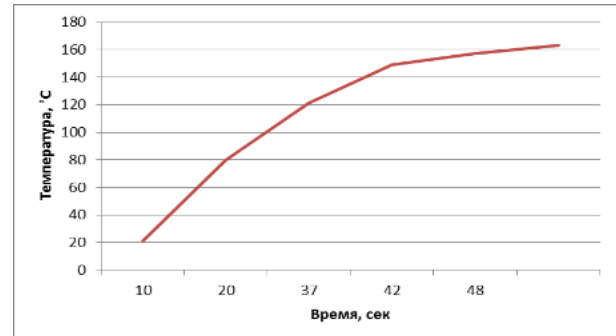
д (e)



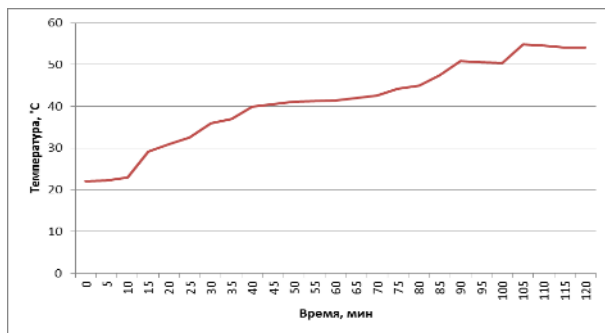
е (f)



ж (g)



з (h)



и (i)

**Рис. 3** График изменения температуры нагрева ЛИА: а – LT-LFP170В; б – EnerDel (при розливе бензина); в – LT-LFP170В; г – EnerDel (при перегреве); д – LT-LFP170В; е – EnerDel (при коротком замыкании); ж – LT-LFP170В; з – EnerDel (при падении с высоты); и – LT-LFP170В (при перезарядке)

**Fig. 2** Graph of changes in the heating temperature of the LIA: а – LT-LFP170В; б – EnerDel (when filling gasoline); в – LT-LFP170В; д – EnerDel (when overheating); е – LT-LFP170В; ф – EnerDel (when short-circuiting); г – LT-LFP170В; з – EnerDel (when falling from a height); и – LT-LFP170В (when recharging)

Аналогичным образом вели себя аккумуляторы и при испытаниях на перегрев [12]. От воздействия источника тепла, которым являлась термоэлектрическая панель, начинает разогреваться и плавится корпус аккумулятора, что в последующем приводит к его возгоранию. Корпуса ячеек ЛИА выполнены из неустойчивых к прямому тепловому воздействию материалов. Необходимо рассмотреть возможность изготовления корпусов ЛИА из негорючих и трудногорючих материалов.

Наиболее часто возгорание и взрывы аккумуляторов происходят из-за короткого замыкания анода и катода в силу различных причин. При коротком замыкании анодов и катодов аккумуляторов происходил сильный разогрев металлической замыкающей конструкции, что приводило к воспламенению от нее пластиковых корпусов аккумуляторов [13, 14]. Произошел нагрев клемм аккумуляторов с последующим возгоранием пластика корпусов вокруг клемм. Однако резкого увеличения скорости экзотермиче-

ских процессов внутри аккумуляторов, приводящих к взрыву, при данном испытании не наблюдалось.

Системы защиты не могут предотвратить внешнее короткое замыкание, которое может произойти вследствие халатности при проведении технического обслуживания (забытый в отсеке инструмент или другой проводник). Клеммы располагаются слишком близко друг к другу и не имеют изоляции [15].

### Заключение

В результате испытаний на стойкость к падению ЛИА с высоты произошло разрушение корпусов аккумуляторов без дальнейших замыканий и протекания экзотермических реакций. Однако при получении механических повреждений защитного корпуса ЛИА стало возможным попадание внутрь влаги (конденсат, осадки, технические жидкости) или других химически активных веществ, что сопряжено с риском протекания опасных для пассажиров химических реакций.

В ходе испытаний при перезарядке аккумуляторных батарей произошло незначительное нагревание корпусов аккумуляторов без серьезных (видимых) последствий. Система безопасности батареи не позволяет перезарядить ЛИА и обеспечивает пожарную безопасность ЛИА от возгорания вследствие перегрева или перезаряда энергией. В случае неисправности системы безопасности возможно достижение температуры самопроизвольного термического разгона. Необходимо обеспечение дополнительных контрольных мероприятий при зарядке ЛИА.

В ходе испытаний при воздействии на ЛИА внешних источников тепла (фрикционных искр) произошло незначительное нагревание корпусов аккумуляторов без их повреждений. Корпуса ячеек ЛИА выполнены из устойчивых к воздействию внешних маломощных источников тепла (фрикционных искр) материалов. Однако попадание раскаленных частиц металлов на выводные клеммы может способствовать их окислению и некорректной работе в дальнейшем. По причине чего повышается опасность возникновения КЗ при аварийных режимах работы электрических цепей.

В ходе испытаний на розлив и воспламенение бензина под отсеком аккумуляторной батареи при дорожно-транспортном происшествии произошло обильное выделение густого черного дыма начиная со второй минуты эксперимента. При возгорании ЛИА, расположенного в багажном отсеке, продукты горения (дым) могут значительно замедлить эвакуацию пассажиров и нанести вред их здоровью. Необходимо проведение натурных испытаний и поиск путей решения проблемы.

Помимо этого, полученные результаты, могут служить неплохим заделом для дальнейших исследований в данной области. Безусловно, необходимо проводить комплексные натурные испытания, в том числе в составе троллейбуса, для получения более точных данных теоретических и практических решений по сценариям развития пожара в городском пассажирском электротранспорте, использующем ЛИА. Эта отрасль требует дополнительного анализа и оценки данных, характерных для электрифицированных силовых агрегатов, и добавления соответствующих испытаний, таких как опасность низких температур, самовоспламеняемость и токсичность.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кубанов, И. Н. Риск ориентированная методика испытания аккумуляторных батарей для троллейбусов с увеличенным автономным ходом / Д.Ю. Минкин, И. Н. Кубанов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 1(65). – С. 155-163.
2. Пожарная безопасность автотранспорта с высоковольтным силовым оборудованием и объектов его транспортной инфраструктуры / О. В. Двоенко, И. А. Гусев, А. А. Шульпинов, В. А. Кузьменко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 4. – С. 11-17. – DOI 10.25257/FE.2020.4.11-17.
3. Моторыгин Ю. Д., Баранова Я. А., Латышев А. О. Расчет пожарных рисков на транспорте стохастическим методом //Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2014. – Т. 1. – №. 1 (5). – С. 13-16.
4. Кубанов, И. Н. Преимущества использования троллейбусов с увеличенным автономным ходом для снижения негативного воздействия на окружающую среду / Д. Ю. Минкин, И. Н. Кубанов // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2021: Материалы Международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 82-85. – EDN GRGHMX.
5. Ребров С. Г. и др. Исследования литий-ионных аккумуляторов космического назначения на пожаровзрывобезопасность //Труды МАИ. – 2014. – Т. 72. – С. 1.
6. Ежелева Е. Е., Мельник А. А., Елисеев Ю. Н. Исследование пожаров связанных с возгоранием литий-ионных аккумуляторных батарей на транспорте //Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – №. 1. – С. 50-53.

7. Демидович И. С., Савин В. А. Проблемы безопасности аккумуляторных батарей современного электротранспорта. – 2020.
8. Кубанов, И. Н. Противопожарная защита городского пассажирского электротранспорта / Д. Ю. Минкин, И. Н. Кубанов // Пожарная безопасность объектов капитального строительства. Нормативы, проектирование, устройство и эксплуатация: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 72-77. – EDN OOWOON.
9. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures //Energies. – 2021. – Т. 15. – №. 1. – С. 11.
10. Ping P. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test //Journal of Power Sources. – 2021. – Т. 285. – С. 80-89.
11. Плотников В. Г., Чешко И. Д., Кондратьев С. А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе //Исследование пожаров. – 2019. – С. 53-58.
12. Мокряк А. В. Анализ пожарной опасности электромобилей //Modern Science. – 2021. – №. 1-2. – С. 475-479.
13. Møller I. M. Plant mitochondria and oxidative stress: electron transport, NADPH turnover, and metabolism of reactive oxygen species //Annual review of plant biology. – 2021. – Т. 52. – №. 1. – С. 561-591.
14. Аносов Е. Ю., Ушкалов В. В., Бутенко Ю. Л. Пожарная опасность литий-ионных батарей устанавливаемых на электроавтомобилях //Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – №. 3. – С. 46-49.
15. McKenna S. T., Hull T. R. The fire toxicity of polyurethane foams //Fire Science Reviews. – 2020. – Т. 5. – №. 1. – С. 1-27.

#### References

1. Minkin D.Y., Kubanov, I. N. Risk-oriented method of testing batteries for trolleybuses with increased autonomous travel. Problems of risk management in the technosphere. 2023; 1(65): 155– 163 (rus).
2. Dvoenko O.V. Fire safety of vehicles with high-voltage power equipment and objects of its transport infrastructure. Fires and emergencies: prevention, elimination. 2020; 4: 11– 17. DOI:10.25257/FE.2020.4.11-17 (rus).
3. Motorygin Yu.D., Baranova Ya.A., Latyshev A.O. Calculation of fire risks in transport by stochastic method. Fire safety: problems and prospects. 2014; 1(5): 13-16 (rus).
4. Kubanov I. N. Advantages of using trolleybuses with increased autonomous travel to reduce the negative impact on the environment. Transport of Russia: problems and prospects - 2021: Materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09-10, 2021; 82-85 (rus).
5. Rebrov S.G., Janchur S.V., Mansurov V.S., Moskovkin S.A. Research of lithium-ion batteries for space purposes on fire and explosion safety. Proceedings of MAI. 2014; 72: 1 (rus).
6. Ezheleva E. E., Mel'nik A. A., Eliseev Y. N. Investigation of fires associated with ignition of lithium-ion batteries in transport. Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2021; 1: 50–53 (rus).
7. Demidovich I.S., Savin V.A. Problems of safety of batteries of modern electric transport. 2020. (rus).
8. Kubanov I. N. Fire protection of urban passenger electric transport // Fire safety of capital construction objects. Standards, design, device and operation: materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, April 21, 2022; 72–77 (rus).
9. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures. Energies. 2021; 1: 11.
10. Ping P. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. Journal of Power Sources. 2021; 285: 80–89.
11. Plotnikov V.G., Cheshko I.D., Kondrat'ev S.A. Fire hazard of lithium-ion batteries and low-voltage power sources based on them. Investigation of fires. 2019; 53–58 (rus).
12. Mokryak A.V. Analysis of the fire hazard of electric vehicles. Modern Science. 2021; 1-2: 475–479 (rus).
13. Møller I.M. Plant mitochondria and oxidative stress: electron transport, NADPH turnover, and metabolism of reactive oxygen species. Annual review of plant biology. 2021; 52(1): 561-591.
14. Anosov E.Yu., Ushkalov V.V., Butenko Yu.L. Fire hazard of lithium-ion batteries installed on electric vehicles. Fire and technospheric safety: problems and ways of improvement. 2020; 3: 46–49 (rus).
15. McKenna S.T., Hull T.R. The fire toxicity of polyurethane foams. Fire Science Reviews. 2020; 5(1): 1–27.



**Информация об авторах**

**Минкин Денис Юрьевич**, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, доктор технических наук, Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России; Россия 196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект д. 149, ORCID: 0000-0003-4651-8526; e-mail: [igps001@mail.ru](mailto:igps001@mail.ru)

**Кубанов Ибрагим Наурузович**, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; Россия (196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект д. 149, ORCID: 0000-0002-4108-3135; SPIN: 2333-0244; e-mail: [ibragim.kubanov@bk.ru](mailto:ibragim.kubanov@bk.ru)

**Information about the authors**

**Denis Y. Minkin**, Professor of the Department of Fire Safety-news of buildings and automated fire extinguishing systems of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Moskovsky Ave., 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4651-8526; e-mail: [igps001@mail.ru](mailto:igps001@mail.ru)

**Ibragim N. Kubanov**, Deputy Head of the Research Institute of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia Moskovsky Ave., 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4108-3135; SPIN: 2333-0244; e-mail: [ibragim.kubanov@bk.ru](mailto:ibragim.kubanov@bk.ru)

УДК 614.844.2

## СВЕРХЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна,  
Тужиков Евгений Николаевич

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Создан прототип гибридной установки объемного пожаротушения, в котором реализован механизм создания мелкодисперсного водяного тумана путем распыления жидкости сверхзвуковым газовым потоком. Проведено экспериментальное определение скоростей и расходов потоков воды и азота при различных соотношениях массового расхода воды к расходу азота. На основании экспериментальных данных построена аналитическая зависимость зауреровского диаметра для распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота. Проведена экспериментальная оценка дисперсности распыления, которая оказалась значительно выше, чем расчетная что объясняется более высокой скоростью распыляющего газа, чем в предыдущих исследованиях. Для созданного прототипа гибридной установки пожаротушения получено самое высокое из известных соотношение расхода жидкости к расходу распыляющего газа, выше которого генерирование устойчивого мелкодисперсного водяного тумана трудноосуществимо.

**Ключевые слова:** гибридное пожаротушение, двухфазное распыление, дисперсность воды, мелкодисперсный водяной туман, объемное тушение

## SUPERSONIC WATER SPRAYING FOR VOLUMETRIC FIRE EXTINGUISHING

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

### ABSTRACT

A prototype of a hybrid volumetric fire extinguishing system has been created, which implements a mechanism for creating a fine water mist by spraying liquid with a supersonic gas flow. Experimental determination of the velocities and flow rates of water and nitrogen flows at different ratios of mass water flow to nitrogen flow is carried out. Based on experimental data, an analytical dependence of the Sauter mean diameter for the sprayed water on the ratio of the mass flow rate of water to the nitrogen flow rate is constructed. An experimental assessment of the dispersion of spraying was carried out, which turned out to be significantly higher than the calculated one, which is explained by a higher rate of spraying gas than in previous studies. For the created prototype of a hybrid fire extinguishing system, the highest known ratio of liquid flow to atomizing gas flow was obtained, above which the generation of stable fine-dispersed water mist is difficult to achieve.

**Keywords:** hybrid suppression systems, two-phase spraying, water dispersion, fine water mist, volumetric extinguishing

### Введение

Противопожарная защита особо важных зданий и помещений, таких как объекты со сложным и дорогостоящим электронным и/или лабораторно-промышленным оборудованием, музеи, библиотеки и т. д., где величина ущерба от воздействия огнетушащих веществ является наиболее критичной, требует новых подходов в создании соответствующих пожаротушащих систем.

Применение на таких объектах установок объемного газового тушения, казалось бы, решает или минимизирует проблему ущерба от воздействия огнетушащих веществ. Однако системы объемного газового тушения имеют ряд существенных недостатков и ограничений в применении: высокая стоимость, как самой системы, так и ее периодического обслуживания и перезарядки; газовые системы недостаточно эффективны для тушения тлеющих материалов и требуют герметичности помещения и соответствующих вентиляционных каналов; необходима предварительная эвакуация людей из зоны применения таких систем. Высокоинтенсивный выброс большого объема газа под высоким давлением может вызвать повреждение дорогостоящего электронного и/или лабораторно-промышленного оборудования, музейных и библиотечных ценностей. Например, установлено, что компьютерные диски хранения данных зачастую повреждаются из-за высокого уровня звукового давления при срабатывании системы газового пожаротушения.

На основании вышеизложенного можно заключить, что исследование и разработка новых систем объемного пожаротушения, лишенных указанных недостатков, является актуальной задачей.

Вода (включая водные растворы) до сих пор остается самым доступным и распространенным огнетушащим веществом. Новые методы и способы применения воды при пожаротушении позволяют значительно увеличить ее огнетушащую эффективность, в первую очередь за счет повышения дисперсности генерируемых капель воды, что, в свою очередь, приводит как к повышению эффективности действующих, так и к появлению новых, не характерных для воды грубого распыла, механизмов тушения.

В ГОСТ Р 53288-2009 указано, что тонкораспыленным считается капельный поток огнетушащей жидкости со среднеарифметическим диаметром капель не более 150 мкм.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что при достаточно высокой дисперсности и интенсивности подачи тонкораспыленной воды (ТРВ) может достигаться эффект объемного пожаротушения в замкнутых отсеках или помещениях [1, 2].

ТРВ со среднеарифметическим диаметром капель выше  $\approx 70$  мкм и нормативной интенсивностью подачи, в соответствии с известными графиками дисперсного распределения капель, не может обеспечить объемного пожаротушения, т. к. концентрация капель, способных длительное время оставаться в объеме помещения, в этом случае будет недостаточной.

Более подходящим критерием дисперсности капель для пожаротушения является средний объемно-поверхностный диаметр по Заутеру –  $D_{32}$ . Верхняя граница значений  $D_{32}$  для капель воды, обеспечивающая возможность объемного пожаротушения при соответствующей

интенсивности подачи, по данным различных исследователей находится в диапазоне от 20 до 90 мкм [2].

В последние годы за рубежом активно развивается новая технология пожаротушения – так называемые гибридные системы пожаротушения (Hybrid Suppression Systems), применяемые для защиты различных помещений с малой степенью негерметичности. В этих системах для объемного тушения пожара используется инертный газ (обычно азот) в сочетании с мелкодисперсным водяным туманом (МВТ), в котором заутеровский диаметр капель  $D_{32}$  не превышает нескольких десятков микрон, что позволяет создать в защищаемом объеме устойчивый водяной туман. МВТ в этом случае генерируется по двухфазному механизму распыления, при этом эффективность тушения во многих случаях выше, чем у систем, в которых используется только инертный газ или только ТРВ [3].

Основное преимущество гибридных систем пожаротушения заключается в том, что они сочетают в себе достоинства ТРВ и систем газового пожаротушения, при этом возможный ущерб от воздействия огнетушащих веществ минимален. В настоящее время эта инновационная технология все чаще используется за рубежом в стационарных системах пожаротушения.

Все возрастающее внимание к гибридным системам пожаротушения может быть охарактеризовано как разработкой и совершенствованием нормативной базы для таких устройств, в частности за рубежом действуют следующие стандарты, посвященные именно гибридным системам: FM Approvals Standard 5580 (2012); NFPA 770 (2020), так и появлением нескольких производителей, которые представляют на зарубежном рынке гибридные системы пожаротушения. Из представленных на рынке наиболее известны следующие гибридные системы

пожаротушения: Aquasonic, разработанная и производимая компанией ANSUL, и система Vortex, разработанная и производимая компанией Victaulic [3].

В нашей стране направление гибридного пожаротушения только начинает развиваться, нами найдено лишь несколько отечественных журнальных статей, посвященных этой тематике [2, 4, 5]. Отсюда следует вывод об актуальности проведения научно-исследовательских работ, направленных на создание отечественной гибридной системы объемного пожаротушения.

В последние десятилетия получили распространение устройства и установки пожаротушения с применением двухфазной технологии распыления огнетушащей жидкости расширяющимся газом. Вне зависимости от способа технической реализации двухфазного распыления можно назвать следующие общие характеристики таких систем:  $D_{32}$  капель распыленной жидкости находится вблизи значения в 100 мкм, отношение массовых расходов жидкости и газа  $G_{ж}/G_{г}$  находится в пределах от 15 до 40 [6].

Как следует из самых общих соображений, для получения большей дисперсности при двухфазном распылении необходимо уменьшать отношение расхода жидкости и газа, а также увеличивать скорость, с которой газ и распыляемая жидкость сталкиваются друг с другом.

Создание и повышение эффективности гибридных установок пожаротушения требует оптимизации многих параметров, зачастую имеющих обратную взаимосвязь. Задачей настоящего исследования является разработка конструкции и оптимизация параметров прототипа гибридной системы объемного пожаротушения.

### Результаты и их обсуждение

Обозначения и исходные данные:

- $\Delta P$  – усредненное избыточное давление воды и азота на входе в сопла (2,5 МПа);
  - $G_{ж}$  – массовый расход воды, кг/с;
  - $G_{г}$  – усредненный массовый расход азота (0,09 кг/с);
  - $D_{32}$  – заутеровский диаметр капле распыляемой воды, мкм;
  - $V_{г}$  – усредненная скорость азота на выходе из газового сопла (560 м/с);
  - $V_{ж}$  – усредненная скорость воды на выходе из водяного сопла (69 м/с);
  - $P_0$  – усредненное атмосферное давление при измерениях (0,098 МПа);
  - $T$  – усредненная температура окружающего воздуха при измерениях (297 К);
  - $S$  – площадь водяного сопла, м<sup>2</sup>;
  - $R$  – газовая постоянная для азота (297 Дж/кг·К);
  - $k$  – показатель адиабаты для азота (1,4);
  - $\rho_{г}$  – плотность азота (1,1 кг/м<sup>3</sup>);
  - $\rho_{ж}$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>);
  - $\alpha$  – угол встречи потоков воды и азота (60°);
  - $\eta$  – вязкость воды (0,01 пз);
  - $\gamma$  – поверхностное натяжение воды (72 дин/см);
  - $\varphi$  – коэффициент скорости истечения для водяного сопла (0,98);
- усредненная относительная влажность окружающего воздуха  $\approx 70$  %.
- Кроме параметров самого защищаемого помещения (геометрии, пожарной нагрузки, негерметичности и возможных

сценариев пожара) эффективность пожаротушения будет определяться следующими характеристиками гибридной установки пожаротушения: дисперсностью, интенсивностью подачи и временем достижения во всем объеме помещения пожаротушающей концентрации МВТ. Эти характеристики гибридных установок пожаротушения зачастую имеют обратную взаимосвязь, что усложняет задачу по их разработке.

Определим граничные условия и основные параметры для разработки прототипа гибридной установки пожаротушения.

Из литературных источников известно, что эффективность гибридного пожаротушения увеличивается по мере увеличения расхода воды подаваемой на тушение, при этом должна сохраняться требуемая для объемного пожаротушения дисперсность распыления [7]. Из этого следует, что при разработке гибридной системы пожаротушения необходимо добиваться достижения максимального значения соотношения массового расхода воды к расходу распыляющего газа, при котором генерируется устойчивый МВТ.

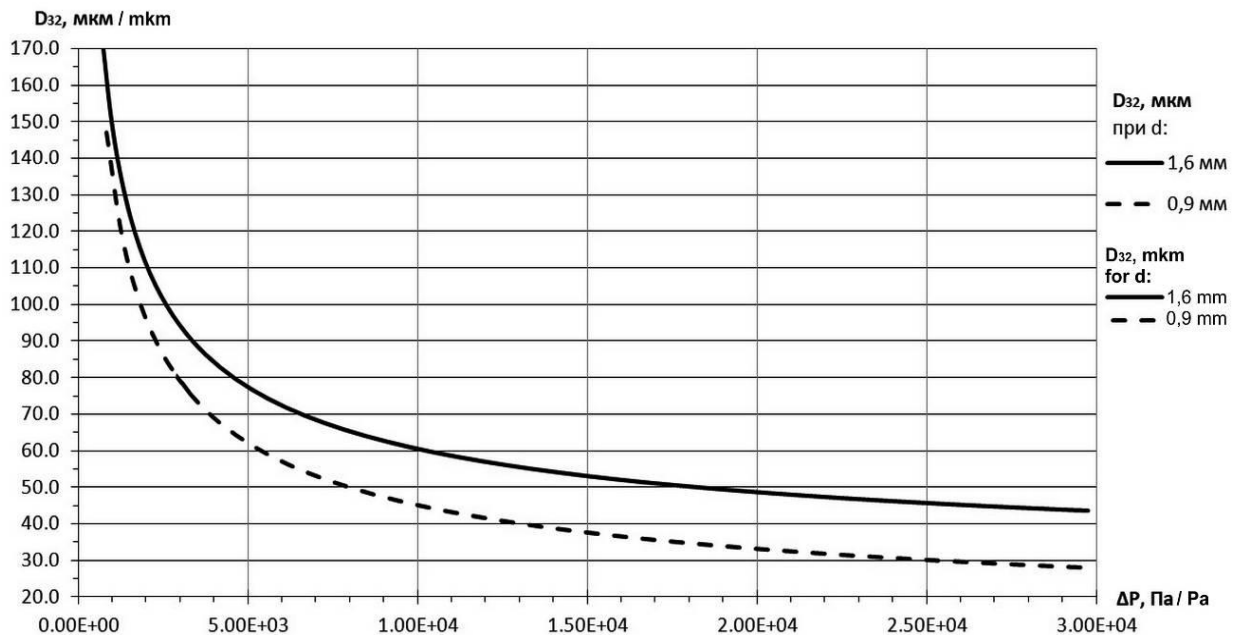
В предыдущих исследованиях показано, что в самом общем случае при распылении жидкости скоростным газовым потоком дисперсность жидкости увеличивается при увеличении давления подачи газа и снижении соотношения расхода жидкости к расходу распыляющего газа.

Дисперсность капле при распылении жидкости скоростным газовым потоком может быть определена на основании эмпирической формулы для вычисления заутеровского диаметра, полученной Накиямой и Танасавой [8]. Если заменить объемные расходы жидкости и газа в указанной формуле на их массовые эквиваленты, формулу  $D_{32}$  можно записать в следующем виде:

$$D_{32} = \frac{585}{V_{\Gamma} - V_{\text{ж}}} \left( \frac{\gamma}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} + 597 \left( \frac{\eta}{(\gamma \rho_{\text{ж}})^{0,5}} \right)^{0,45} \left( \frac{\rho_{\Gamma} G_{\text{ж}}}{G_{\Gamma}} \right)^{1,5} \quad (1)$$

В работе [9] получены расчетные зависимости заутеровского диаметра  $D_{32}$  капель воды, распыляемой скоростным потоком воздуха, от давления распыляющего воздуха  $\Delta P$ , (рис. 1) для двух водяных

сопел диаметром  $d$  1,6 и 0,9 мм, выполненные по формуле (1); соотношения массового расхода воды к расходу воздуха  $G_{\text{ж}}/G_{\Gamma}$  для этих сопел – 0,64 и 0,22 соответственно.



**Рис. 1.** Расчетные зависимости заутеровского диаметра распыляемой воды от давления распыления для двух водяных сопел

**Fig. 1.** Calculated dependences of the Sauter diameter of the sprayed water on the spray pressure for two water nozzles

Из графика (рис. 1) следует, что: при росте давления распыления уменьшается заутеровский диаметр для капель распыляемой воды, т. е. дисперсность распыления повышается за счет увеличения скорости, с которой воздух и распыляемая вода сталкиваются друг с другом  $V_{\Gamma} - V_{\text{ж}}$ ; при снижении соотношения расхода воды к расходу воздуха, уменьшается заутеровский диаметр для капель распыляемой воды, т.е. дисперсность распыления также повышается. Эти выводы согласуются с данными, полученными в других работах [8].

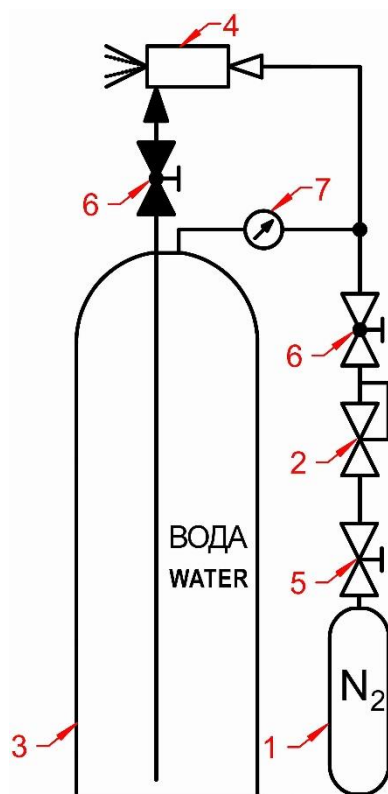
Для исследования процесса распыления жидкости был создан прототип

гибридной установки пожаротушения, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Работа системы основана на взаимодействии сверхзвукового потока азота со щелевой струей воды с образованием двухфазного факела МВТ. Исследования проводились при различном соотношении расхода воды к расходу азота.

В установке (рис. 2) сжатый азот содержится в газовом баллоне высокого давления (1), выход из которого соединен с высокопроизводительным газовым редуктором высокого давления (2); после редуктора азот под давлением  $\approx 2,5$  МПа поступает в бак с водой (3) и одновре-

менно к двухфазной распылительной форсунке 4; вода из бака поступает одновременно с азотом к распылительной форсунке, где формируется высокоскоростной газожидкостный поток.

Давление распыления  $\approx 2,5$  МПа было выбрано из следующих соображений: как показано выше, при увеличении давления, дисперсность распыления увеличивается; с другой стороны, увеличение



**Рис. 2.** Схема прототипа гибридной установки пожаротушения где: 1 – газовый баллон высокого давления; 2 – высокопроизводительный газовый редуктор; 3 – бак с водой; 4 – распылительная форсунка; 5 – баллонный вентиль; 6 – шаровые краны; 7 – манометр  
**Fig. 2.** Diagram of the prototype of a hybrid fire extinguishing system where: 1 – high-pressure gas cylinder; 2 – high-performance gas reducer; 3 – water tank; 4 – spray nozzle; 5 – balloon valve; 6 – ball valves; 7 – pressure gauge

давления свыше 2,5 МПа приводит к повышенным нормативным требованиям для установок пожаротушения.

Сопла Лавалья представляют собой профилированные каналы с входным конфузором и выходным диффузором, такие сопла широко используются в различных областях науки и техники как наиболее простые и эффективные устройства для получения сверхзвуковых газовых потоков [10].

Для нашего случая сопло Лавалья с центральным осесимметричным профилированным каналом является наиболее эффективным при преобразовании избыточного давления газа в его кинетическую энергию; т. к. у указанного сопла наибольшее соотношение площади критического сечения к площади ограждающих поверхностей сопла, что ведет к уменьшению сопротивления газового потока внутри проектируемого сопла.

Расчет геометрических характеристик сопла Лавалья и его проектирование проводилось на основании предварительных опытов по определению расходных характеристик высокопроизводительного газового редуктора высокого давления, который был выбран как наиболее соответствующий целям настоящего исследования из доступных на рынке. Расчет сопла Лавалья проводился на основании известной методики вычисления

скорости газа с использованием одномерных уравнений для изоэнтропического потока идеального газа, которая изложена, например, в работах [10, 11]. При расчете предполагается, что поток – одномерный, газ – идеальный и совершенный, течение – изоэнтропическое. В таблице приведены исходные параметры и выходные расчетные характеристики для разработанного сопла Лавалья.

**Таблица.** Исходные параметры и выходные расчетные характеристики для разработанного сопла Лавалья

**Table**  
Initial parameters and output design characteristics for the developed Laval nozzle

$\Delta P$ , МПа $\Delta P$ , МПа	$P_0$ , МПа $P_0$ , МПа	$T$ , К	$G_r$ , кг/с $G_{gas}$ , kg/s	$R$ , Дж/кг·К $R$ , J/kg·K	$k$	$V_r$ (расчет), м/с $V_{gas}$ calc
2,5	0,098	297	0,09	297	1,4	610

Для соблюдения условия изоэнтропичности газового потока изменение его параметров по длине сопла Лавалья должно быть плавное и постепенное. Исходя из этого условия были выбраны длины конфузора и диффузора проектируемого сопла. Для максимально плавного изменения параметров газового потока по длине сопла, конфузор и диффузор были выполнены коноидальной формы, пример построения коноидального профиля приведен в работе [12]. Сопло Лавалья (рис. 3), для максимального соответствия спроектированной геометрии и снижения сопротивления газовому потоку, изготовлено из полимера методом 3D-принтинга с тщательной полировкой внутренней поверхности.

В распылительной форсунке подача воды в сверхзвуковой поток азота осуществляется через щелевое кольцевое сопло, расположенное за выходным срезом сопла Лавалья. Образующие водяного сопла также выполнены коноидальной формы и отполированы. Для увеличения

скорости, с которой азот и распыляемая вода сталкиваются друг с другом, подача воды происходит во встречном направлении к потоку азота; угол встречи потоков  $\alpha$  равен  $60^\circ$ . Для изменения соотношения расхода воды к расходу азота ширина щелевого сопла выполнена регулируемой. Наличие плавного и оперативного регулирования соотношения расхода воды к расходу азота значительно расширяют возможности данной системы по применению для различных сценариев пожара и защищаемых объемов. На рис. 3 приведено схематическое изображение продольного разреза распылительной форсунки.

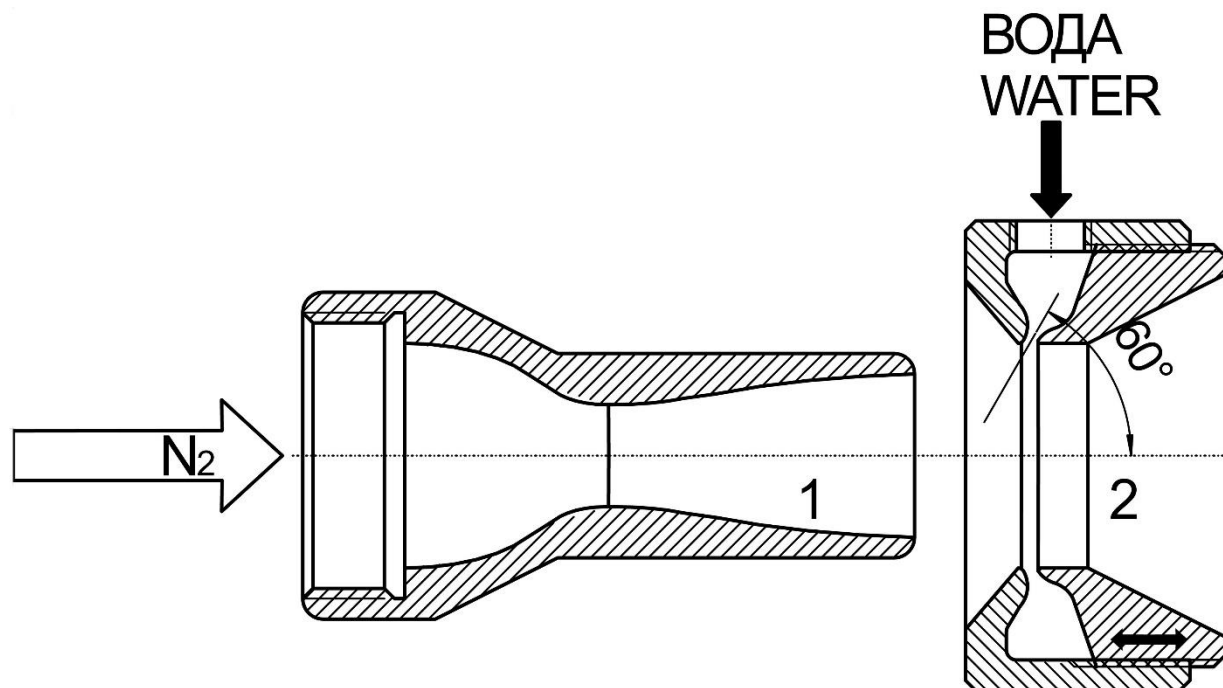
Экспериментальное определение скорости потока азота из разработанного сверхзвукового сопла проводилось с помощью программно-аппаратного комплекса для экспериментального определения параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости [12]. Во время проведения экспериментов по определению



скорости потока азота вода в распылительную форсунку не подавалась.

Усредненное значение экспериментально определенной скорости потока азота  $V_T$  при указанных выше условиях эксперимента составило 560 м/с – это значение достаточно близко к скорости азота,

полученной при расчетном режиме работы сопла Лавалья (см. табл.); что доказывает справедливость вышеуказанных допущений при расчете и проектировании сверхзвукового газового сопла.



**Рис. 3.** Продольный разрез распылительной форсунки где: 1 сопло Лавалья; 2 щелевое кольцевое водяное сопло

**Fig. 3.** Longitudinal section of the spray nozzle where: 1 Laval nozzle; 2 slotted annular water nozzle

Коноидальные жидкостные сопла обладают наименьшими гидравлическими потерями и у них практически отсутствует эффект сжатия струи, следовательно, скорость истечения жидкости при постоянном давлении подачи остается также неизменной вне зависимости от площади сопла. Скорость истечения, в пределах ошибки измерения, во всех опытах соответствовала закону Торричелли с учетом коэффициента скорости истечения для применяемых коноидальных сопел –  $\phi = 0,98$  [12].

Во всех опытах давление распыления поддерживалось примерно постоянным и находилось в диапазоне  $\Delta P = 2,4 - 2,6$  МПа. Скорость истечения

воды из кольцевого сопла в распылительной форсунке ( $V_{ж}$ ) может быть определена по формуле (2):

$$V_{ж} = \phi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ж}}} \quad (2)$$

Скорость воды ( $V_{ж}$ ) на выходе из сопла при  $\Delta P = 2,5$  МПа, вычисленная по формуле (2) – составляет 69 м/с.

Другое выражение для скорости подачи воды (3) может быть получено из экспериментально определенных расходов воды ( $G_{ж}$ ) и площадей выходного сечения кольцевого сопла  $S$  при условиях несжимаемости жидкости, отсутствия сжатия струи, неразрывности и непрерывно-

сти течения. Отсутствие сжатия струи является одной из характеристик коноидальных сопел [12].

$$V_{ж} = \frac{G_{ж}}{\rho_{ж}S} \quad (3)$$

Усредненная скорость воды на выходе из сопла, определенная на основании экспериментальных данных по формуле (3), в пределах ошибки измерения совпадает со скоростью, вычисленной по формуле (2), что доказывает справедливость вышеуказанных допущений относительно водяного сопла.

Для оценки качества распыления разработанным прототипом гибридной установки пожаротушения были проведены опыты по распылению воды сверхзвуковым потоком азота. Опыт проводился при различном соотношении расхода

воды к расходу азота, длительность каждого опыта по распылению составляла около 5 с.; остальные характеристики и параметры распыления приведены выше. После завершения каждого опыта взвешиванием определялись массовые расходы воды и азота. В расходе газа не учитывалась та часть азота, которая затрачивалась на вытеснение воды из бака.

Оценить дисперсность распыления исходя из экспериментальных данных по расходным характеристикам распылительной форсунки можно на основании формулы (1). Если учесть, что потоки азота и воды в разработанной форсунке движутся навстречу друг другу под углом  $\alpha$ , формулу (1) для расчета заутеровского диаметра –  $D_{32}$  можно записать в следующем виде (4):

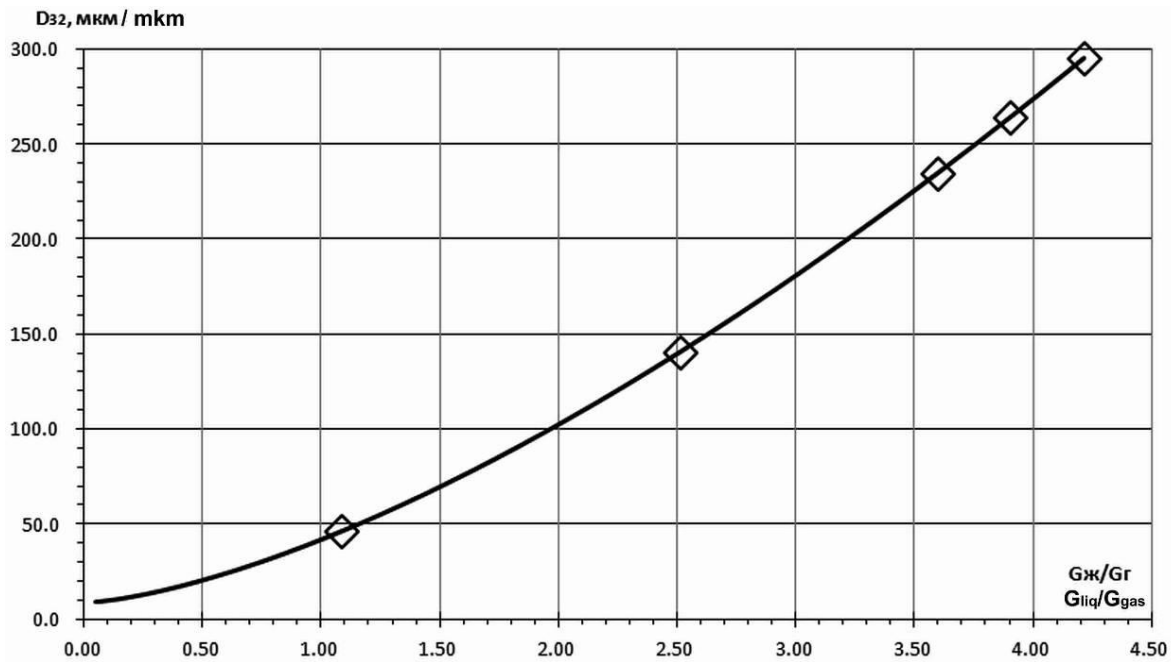
$$D_{32} = \frac{585}{V_{г} + \cos \alpha V_{ж}} \left( \frac{\gamma}{\rho_{ж}} \right)^{0,5} + 597 \left( \frac{\eta}{(\gamma \rho_{ж})^{0,5}} \right)^{0,45} \left( \frac{\rho_{г} G_{ж}}{G_{г}} \right)^{1,5} \quad (4)$$

На рис. 4 приведена зависимость заутеровского диаметра –  $D_{32}$  распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота  $G_{ж}/G_{г}$ . На графике в виде линии приведена аналитическая зависимость, рассчитанная по формуле (4) с учетом экспериментальных данных по расходным характеристикам распылительной форсунки, маркеры соответствуют значениям  $G_{ж}/G_{г}$ , при которых проводились опыты по распылению.

Из рис. 4 следует, что при увеличении соотношения расхода жидкости к расходу распыляющего газа и при прочих

неизменных условиях распыления заутеровский диаметр распыляемой воды растет по экспоненциальному закону.

Опыты по распылению проводились в помещении размерами в плане 6×18 м и высотой 5 м. Факел распыления ориентировался по длинной оси помещения с учетом исключения его контакта с ограждающими конструкциями. Видимая высота нижней границы факела МВТ в его конечной части находилась на уровне  $\approx 2$  м от поверхности пола. Относительная влажность окружающего воздуха во время экспериментов по распылению была вблизи 70 %.



**Рис. 4.** Зависимость заутеровского диаметра распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота

**Fig. 4.** The dependence of the Sauter diameter of the sprayed water on the ratio of the mass flow rate of water to the nitrogen flow rate

После каждого опыта по распылению, для приведения влажности в помещении к исходному значению, проводилось интенсивное вентилирование помещения. Характерная фотография факела распыления при соотношении массового

расхода воды к расходу азота –  $G_{ж}/G_{г} = 2,5$  приведена, на рис. 5.

Оценить дисперсность распыления можно исходя из визуального наблюдения гравитационного осаждения капель распыляемой воды на поверхность пола.



**Рис. 5.** Фотография факела распыления

**Fig. 5.** Photo of the spray plume

Осаждение капель на поверхность пола наблюдалось только при  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$ , следовательно, в этом случае самые крупные капли в факеле распыления не успевали испариться за время седиментации на поверхность пола с высоты  $\approx 2$  м. Для определения соответствия графика приведенного на рис. 4 экспериментальным данным оценим размер этих капель. В работе [13] проведены результаты экспериментального исследования кинетики водных капель в воздушной среде. В указанной работе установлено, что при температуре и влажности окружающего воздуха близких к их значениям в настоящем исследовании, капли воды с диаметром  $\geq 130$  мкм достигают поверхности пола при гравитационном осаждении с высоты 2 м; более мелкие капли успевают полностью испариться еще до их осаждения на поверхность пола. Полученные результаты свидетельствуют, что для применяемых в настоящей работе условий распыления генерация МВТ с  $G_{ж}/G_{г} \geq 4,2$  нецелесообразна для целей объемного пожаротушения, т. к. в этом случае наиболее значительный вклад в нестабильность МВТ будет вносить гравитационное осаждение капель. Полученное граничное значение  $G_{ж}/G_{г}=4,2$  является самым большим из тех, что нами найдены в литературных источниках, посвященных получению устойчивых МВТ для целей объемного пожаротушения [14].

Из полученных данных следует, что значения  $D_{32}$  распыляемой воды, вычисленные по уравнению (4), значительно выше, чем определенные из эксперимента. Это обстоятельство можно объяснить тем, что формула (4) признана достаточно достоверной для скоростей течения распыляющего газа с числом Маха до 2 включительно, а в настоящем исследовании скорость азота соответствовала числу Маха  $\approx 2,5$ . Последний вывод подтверждается результатами других исследований.

На основе оценочного значения диаметра самых крупных капель в факеле распыления  $D_{max} = 130$  мкм для условия  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$ , можно оценить соответствующее значение  $D_{32}$ . Как следует из приведенных в литературе [8, 15] примеров, распределение капель по размерам для распыления жидкостей скоростным газовым потоком в сходных с настоящим исследованием диапазонах дисперсности распыления,  $D_{max} \approx 2D_{32}$ , следовательно, в настоящем исследовании для граничного значения –  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$  можно принять, что  $D_{32} = 65$  мкм – это значение является верхней границей значений  $D_{32}$  для капель воды, обеспечивающей, при соответствующей интенсивности подачи, возможность объемного пожаротушения. По данным других исследований  $D_{32} = 65$  мкм, что как раз находится в середине диапазона  $D_{32}$ , при котором возможно объемное пожаротушение – от 20 до 90 мкм [2].

#### Выводы

Из проведенного анализа технологий пожаротушения для объектов, где особенно важна минимизация ущерба от воздействия огнетушащих веществ, сделан вывод о необходимости создания отечественной гибридной системы объемного пожаротушения.

На основании определения граничных условий и решения системы одномерных уравнений для изоэнтропического потока идеального газа проведен расчет и проектирование сопла Лаваля, что позволило разработать прототип гибридной системы объемного пожаротушения, в котором реализован механизм создания мелкодисперсного водяного тумана путем распыления жидкости сверхзвуковым газовым потоком. Наличие плавного и оперативного регулирования соотношения расхода воды к расходу азота значительно расширяют возможности данной системы

по применению для различных сценариев пожара и защищаемых объемов.

Для созданного прототипа гибридной установки проведено экспериментальное определение скоростей и расходов потоков воды и азота при различных соотношениях массового расхода воды к расходу азота. На основании экспериментальных данных построена аналитическая зависимость заутеровского диаметра для распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота.

Из сравнения скоростей гравитационного осаждения и испарения капель распыляемой воды проведена экспериментальная оценка дисперсности распыления, которая оказалась значительно выше, чем

расчетная. Это обстоятельство можно объяснить тем, что расчетные значения достаточно достоверны для скоростей течения распыляющего газа с числом Маха до 2 включительно, в то время как в настоящем исследовании скорость азота соответствовала числу Маха  $\approx 2,5$ .

Полученное граничное значение соотношения массового расхода воды к расходу азота, выше которого, для созданного прототипа гибридной установки получение устойчивого МВТ трудноосуществимо, является самым большим из тех, что нами найдены в литературных источниках посвященных получению устойчивых МВТ для целей объемного пожаротушения.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Экранирование тонкораспыленной водой излучения от пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 6. С. 52–59.
2. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 3. С. 60–69.
3. Raia P., Gollner M. Literature Review on Hybrid Fire Suppression Systems // Fire Protection Research Foundation. May 2014. 32 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Literature-Review-on-Hybrid-Fire-Suppression-Raia-Gollner/e41157bd2f21be850a9106e30b55be7c078766e8> (дата обращения: 16.01.2023).
4. Механизм тушения пламени газодводящими составами ультрадисперсного распыла / С. Н. Копылов, А. В. Казаков, Д. В. Бухтояров и др. // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 67–71.
5. Казаков А. В., Смирнов Н. В., Гладилин А. В. Исследование газодводящих составов ультрадисперсного распыла для установок пожаротушения // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 7. С. 60–65.
6. Антоновский И. В. Исследование формирования двухфазных газодводящих струй: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 147 с.
7. Gałaj J., Tuśnio N., Wolny P., Drzymała T. Analysis of the impact of water flow rate on the temperature variability in a closed room during the extinguishing of A-group fire using a hybrid water mist suppression system // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – 8700. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8700/htm> (дата обращения: 16.01.2023).
8. Nukiyama S, Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an air stream // Trans. Soc. Mech. Eng. Japan. 1939. Vol. 5. P. 68–75. DOI: 10.1063/1.1723225.
9. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Влияние характеристик распыления и свойств огнетушащих жидкостей на конвекционный ток, образуемый заряженными каплями // Техносферная безопасность. 2021. № 2 (31). С. 48–60.
10. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. М., 2014. 576 с.
11. Ковальногов Н. Н. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск, 2010. 219 с.
12. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости // Техносферная безопасность. 2020. № 2 (27). С. 107–121.
13. Wells W.F. On air-borne infection: study II. Droplets and droplet nuclei // American Journal of Hygiene. 1934. Vol. 20. P. 611–618. URL: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/20/3/611/280025?redirectedFrom=fulltext&login=false>.
14. Forssell E.W., Scheffey J.L., DiNenno P.J., Back G.G. False deck development testing of hybrid nitrogen – water mist fire suppression systems // URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R0401171.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R0401171.pdf) (дата обращения: 16.01.2023).

15. Попов С. П. Исследование эффективности тушения модельного очага пожара вязких нефтепродуктов потоком переувлажненного воздуха: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 139 с.

## REFERENCES

1. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N. Shielding of radiation from fire with thinly sprayed water. *Pozharovzryvbezopasnost*. 2017; 6:52–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29811487> (rus).
2. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N., Segal M.D. Features of fire extinguishing in a closed volume with thinly sprayed water. *Fire and explosion safety*. 2017; 3:60–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28949554> (rus).
3. Raia P., Gollner M. Literature Review on Hybrid Fire Suppression Systems // Fire Protection Research Foundation. May 2014; 32. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Literature-Review-on-Hybrid-Fire-Suppression-Raia-Gollner/e41157bd2f21be850a9106e30b55be7c078766e8>.
4. Kopylov S.N., Kazakov A.V., Bukhtoyarov D.V., etc. The mechanism of extinguishing the flame with gas-water compositions of ultrafine spray. *Fire safety*. 2014; 2:67–71. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21617135> (rus).
5. Kazakov A.V., Smirnov N.V., Gladilin A.V. Investigation of gas-water compositions of ultrafine spray for fire extinguishing installations. *Occupational safety in industry*. 2021; 7:60–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46388764> (rus).
6. Antonovsky I.V. Investigation of the formation of two-phase gas-drop jets // Diss. Candidate of Technical Sciences, M., MAI, 2016; 147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30446473> (rus).
7. Gałaj J., Tuśnio N., Wolny P., Drzymała T. Analysis of the impact of water flow rate on the temperature variability in a closed room during the extinguishing of A-group fire using a hybrid water mist suppression system. *Sustainability*. 2020; 12: 8700. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8700/htm>.
8. Nukiyama S, Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an air stream. *Trans. Soc. Mech. Eng. Japan*. 1939; 5:68–75. DOI: 10.1063/1.1723225.
9. Pakhomov G.B., Dultsev S.N., Tuzhikov E.N. Influence of spraying characteristics and properties of extinguishing liquids on the convection current generated by charged droplets. *Technosphere safety*. 2021; 2(31): 48–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46297695> (rus).
10. Dorofeev A.A. Fundamentals of the theory of thermal rocket engines. Moscow: MSTU, 2014. 576. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070160> (rus).
11. Kovalnogov N.N. Applied mechanics of liquid and gas. Ulyanovsk: ULSTU 2010; 219. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19463155> (rus).
12. Pakhomov G.B., Dultsev S.N., Tuzhikov E.N. Software and hardware complex for experimental study of parameters of devices with high-speed liquid supply. *Technosphere safety*. 2020; 2 (27): 107–121. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43080160> (rus).
13. Wells W.F. On air-borne infection: study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Hygiene*. 1934; 20: 611–618. URL: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/20/3/611/280025?redirectedFrom=fulltext&login=false>.
14. Forssell E.W., Scheffey J.L., DiNenno P.J., Back G.G. False deck development testing of hybrid nitrogen – water mist fire suppression systems. URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R0401171.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R0401171.pdf).
15. Popov S.P. Investigation of the effectiveness of extinguishing a model fire of viscous petroleum products with a flow of waterlogged air. Diss. Candidate of Technical Sciences, St. Petersburg UGPS EMERCOM of Russia, 2007. 139. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16124096> (rus).

## Информация об авторах

**Пахомов Георгий Борисович**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 51866; e-mail: [georgy400@yandex.ru](mailto:georgy400@yandex.ru)

## Information about the authors

**Georgy B. Pakhomov**, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Research Department, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 51866; e-mail: [georgy400@yandex.ru](mailto:georgy400@yandex.ru)

**Елфимова Марина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника института по научной работе, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 818459

**Тужиков Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 759898

**Marina V. Elfimova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 818459

**Evgenij N. Tuzhikov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency and Rescue Equipment, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 759898

УДК 614.842.864

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

**Кононенко Елена Венедиктовна, Мокроусова Ольга Анатольевна,  
Черкасский Григорий Александрович, Миронов Андрей Николаевич**

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

### **АННОТАЦИЯ**

Одной из актуальных проблем практического применения риск-ориентированного подхода является доведение до потенциальных пользователей и однозначное толкование положений постоянно обновляемых документов на уровне технических регламентов, стандартов и сводов правил, применяемых в сфере обеспечения пожарной безопасности. Применение риск-ориентированного подхода в области обеспечения пожарной безопасности потребовало обновления правовой и нормативной базы, а также формирования соответствующих компетенций специалистов, способных ориентироваться в вопросах оценки соответствия, и использования методов, разработанных для управления качеством продукции и технологических процессов. До сих пор проблемами являются согласование требований и обеспечение специалистов по пожарной безопасности актуальной информацией в области технического регулирования. Актуальна также проблема подготовки специалистов к применению обновленной версии расчетной оценки индивидуального пожарного риска в общественных зданиях.

**Ключевые слова:** обновление правовой и нормативной базы, влияние человеческого фактора, применение локальных нормативных актов

### **CURRENT PROBLEMS OF THE PRACTICAL APPLICATION OF THE RISK-BASED APPROACH**

**Elena V. Kononenko, Olga A. Mokrousova, Grigorii A. Cherkasskiy, Andrey N. Mironov**

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

### **ABSTRACT**

One of the urgent problems of the practical application of the risk-based approach is the problem of communicating to potential users and unambiguous interpretation of the provisions of constantly updated documents at the level of technical regulations, standards and codes of rules applied in the field of fire safety. The application of a risk-based approach in the field of fire safety required updating the legal and regulatory framework, as well as the formation of appropriate competencies of specialists able to navigate compliance assessment issues, and the use of methods developed for product quality management and technological processes. So far, the problems are the harmonization of requirements and the provision of fire safety specialists with up-to-date information in the field of technical regulation. The problem of training specialists to apply



the updated version of the calculated assessment of individual fire risk in public buildings is also relevant.

**Keywords:** update of the legal and regulatory framework, the impact of the human factor, the application of local regulations

### Введение

В 2022–2023 годах происходило много изменений в области применения риск-ориентированного подхода в разных сферах деятельности по сравнению с тем, что отражено в нашей статье «Развитие понятия риска в сфере управления безопасностью на современном уровне» [1].

За прошедший период на основе применения федеральных законов «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» [2] и «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» [3] реализованы программы профилактики нарушений обязательных требований в области пожарной безопасности при осуществлении федерального государственного пожарного надзора на 2021 и 2022 год; распоряжением МЧС России от 14.12.2022 г. № 1381 утверждена «Программа профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в области пожарной безопасности при осуществлении федерального государственного лицензионного контроля (надзора) за деятельностью по монтажу, техническому обслуживанию и ремонту средств обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений и федерального государственного лицензионного контроля (надзора) за деятельностью по тушению пожаров в населенных пунктах, на производственных объектах и объектах инфраструктуры на 2023 год» [4].

Следует отметить множество изменений, которые должны быть отражены как в практической, так и в преподавательской деятельности при подготовке специалистов в области пожарной безопасности,

что требует выделения приоритетных направлений поиска и анализа правовой и нормативной информации.

В настоящей статье выделены некоторые базовые проблемы решения этих вопросов.

### Основная часть. Развитие риск-ориентированного подхода. Проблемы оценки соответствия и обеспечения информацией

«Программа профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в области пожарной безопасности при осуществлении федерального государственного пожарного надзора органами государственного пожарного надзора на 2023 год», утвержденная Распоряжением МЧС России от 07.12.2022 № 1345 [5], предусматривает дальнейшее применение индивидуального подхода к объектам проверки и расширенное использование самооценки.

В современных условиях снижение «надзорной нагрузки», предполагающей прямое офлайн общение с представителями проверяемого объекта, начавшееся в период пандемии, продолжается и развивается, принимаются постановления Правительства, направленные на продление срока действия ранее выданных свидетельств и сертификатов в сферах государственного регулирования, в частности, в деятельности по обеспечению единства измерений и пожарной безопасности. Параллельно происходит перевод многих процедур оценки и подтверждения соответствия объектов установленным требованиям в электронную форму. Это касается как аккредитации, так и сертификации, и лицензирования.

В связи с этим существует необходимость оценки способности риск-ориентированного подхода заменить сплошной контроль, хотя экономические и организационные преимущества выборочного контроля очевидны. В известной мере ситуация, которая сложилась в настоящее время в области надзорных мероприятий, аналогична повсеместному внедрению статистических методов контроля и управления качеством технологических процессов в промышленности в 1970–80 гг. Именно тогда сложилось представление о риске ошибок первого и второго рода вследствие неизбежного наличия области неопределенности («фиктивный» брак и «тайный» брак) при принятии решений о годности или соответствии продукции. В области статистического управления качеством продукции накоплен большой опыт, действуют международные и отечественные стандарты, которые помогают разрабатывать планы контроля по периодичности (частоте) и объему (размеру выборки).

Для развития риск-ориентированного подхода в целях аудита, контроля и надзора в сфере обеспечения техносферной безопасности привлекаются также разработки в области FMEA – анализа видов и последствий отказов (рассматриваются варианты «что будет, если...» с учетом вероятности события и возможной степени тяжести последствий). Согласно анализу опыта применения FMEA и положениям стандарта ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812-2018) [6, 7], в настоящее время не менее 80 % разработок технических изделий и технологий проводится с применением анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA методологии), что позволяет оценить риски и возможный ущерб, вызванный потенциальными несоответствиями конструкции и технологических процессов, на самой ранней стадии проектирования и создания готового изделия или его комплектующих.

Указанный подход согласуется с широко применяемыми в стране стандартами по менеджменту рисков, поскольку при его использовании тоже предусмотрен расчет приоритетного числа риска (ПЧР) как обобщенного количественного показателя объекта анализа. FMEA-анализ помогает выявить потенциальные нарушения нормативных требований и принять меры для их устранения, однако он не свободен от недостатков, к числу которых относится, в частности, необходимость большого объема информации о процессе производства или эксплуатации объекта защиты (продукции). Присутствует и субъективность оценки риска, так как результат зависит от опыта и знаний участников анализа; для FMEA методологии характерны сложность и трудоемкость.

Программы профилактики рисков, применяемые в Российской Федерации, принимаются во взаимодействии с Росстандартом, который, в свою очередь, действует через Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский институт стандартизации», поскольку эта организация ведет и постоянно обновляет необходимые для разработки программ информационные фонды технических регламентов, общероссийских классификаторов, стандартов.

В тесном взаимодействии с Росстандартом работают «Информационная компания «Кодекс» и профессиональная справочная система (ПСС) «Техэксперт», в информационную поддержку которой входят телеграм-канал «Техэксперт: охрана труда», электронный журнал «Пожарная безопасность: теория и практика», а также регулярно проводимые вебинары по обновлению правовой и нормативной базы обеспечения пожарной безопасности. Доступная на них информация может быть рекомендована для проведения практических и семинарских заня-

тий по дисциплинам, связанным с техническими и организационными аспектами пожарной безопасности. Это обусловлено тем, что ПСС обеспечивает быстрый целевой поиск действующих документов по охране труда, пожарной и промышленной безопасности, экологии, проектированию и эксплуатации зданий и систем обеспечения пожарной безопасности: национальные и межгосударственные стандарты, своды правил, а также технические условия и СанПиН.

Хотя Росстандарт принимает межгосударственные стандарты, деятельность по принятию технических регламентов ЕАЭС, в том числе имеющих отношение к обеспечению пожарной безопасности, а также перечней нормативных документов по стандартизации, сопровождающих технические регламенты, является прерогативой Совета Евразийской экономической комиссии. Среди таких документов следует назвать уже применяемый ТР ЕАЭС 043/2017 [8], принятый ТР ЕАЭС 050/2021 «О безопасности продукции, предназначенной для гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [9], предложен проект ТР ЕАЭС «О безопасности строительных материалов и изделий» [10]. Для анализа новых разработок технических устройств применяются прогнозирование рабочих характеристик продукции на основе компьютерного моделирования и сертификационные испытания, поэтому требования технических регламентов ЕАЭС и национальных документов должны быть согласованы.

Дополнительным источником риска при решении вопросов организации обязательного подтверждения соответствия продукции, подпадающей под действие вышеуказанных технических регламентов по обеспечению пожарной безопасности, является применение несогласованных нормативных документов, содержащих

требования к процедурам сертификации. Введение в действие Технического регламента ЕАЭС «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» [8] вызвало пересмотр раздела VII национального Технического регламента о требованиях пожарной безопасности [11]. Однако этот пересмотр не завершен, так как действующая с 01.03.2023г. версия документа [11] включает в себя статьи 146 и 147, в которых приведены устаревшие схемы подтверждения соответствия.

Еще в 2020 году была принята новая, существенно отличающаяся от прежней, версия национального стандарта ГОСТ Р 53603-2009 «Оценка соответствия. Схемы сертификации продукции в Российской Федерации» – ГОСТ Р 53603-2020 с таким же наименованием [12], введение которого намечалось на 01.01.2021 года. Однако документ был введен в действие лишь 01.01.2023 года. Теперь он действует в Российской Федерации и вместе со вступившим в действие 01.01.2023 года ГОСТ Р 54008-2022 «Оценка соответствия. Схемы декларирования соответствия» [13] устанавливает процедуры обязательного подтверждения соответствия в стране.

Положения национальных стандартов [12, 13] полностью согласуются с действующими в ЕАЭС схемами, приведенными в Решении Совета Евразийской экономической комиссии от 18.04.2018 г. № 44 (ред. от 15.07.2022 г.) «О типовых схемах оценки соответствия» [14].

Кроме того, объекты, на которые распространяется действие Технического регламента ЕАЭС, вышли из сферы действия национального технического регламента. Эта проблема была решена с помощью Распоряжения Правительства РФ № 3646-р от 29.12.2020 г. [15], в результате чего обязательное подтверждение со-

ответствия требованиям 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [11] теперь применяется только к следующему кругу объектов:

- электрические кабели, которые не распространяют горение;
- материалы для отделки и облицовки на ПВХ-основе (например, плиты, пленка и т. д.);
- пленка из полимерной смолы;
- обои из текстиля, флизелина, винила, стекловолокна;
- погонажные материалы или полиэтилена;
- звуко- и теплоизоляция на минераловатной основе;
- звуко- и теплоизоляция из пенополиуретана и стекловолокна;
- наливные полы из пластика, резины или картона;
- ламинат и линолеум;
- напольная плитка из полимеров;
- ковровые покрытия для пола, площадью более 0,3 м<sup>2</sup>;
- листовые и рулонные материалы для гидроизоляции.

Можно ожидать, что в случае принятия проекта технического регламента ЕАЭС «О безопасности строительных материалов и изделий» [10], представленного Минстроем России, также возникнут «узкие места» в части нормативного обеспечения и подтверждения выполнения требований пожарной безопасности. Важным моментом является то, что наряду с механической и санитарно-эпидемиологической безопасностью, доступностью и энергетической эффективностью в проекте регламента присутствует пожарная безопасность, которая должна обеспечи-

ваться с учетом требований всех существующих технических регламентов на эту тему.

В проекте технического регламента используется риск-ориентированный подход при выборе схем подтверждения соответствия с использованием классификации строительных материалов и изделий в зависимости от риска невыполнения базовых требований к безопасности зданий и сооружений (вводятся 4 класса).

Независимая оценка пожарного риска предусмотрена статьей 144 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности [11], она сохраняет свое значение, однако расчетная оценка индивидуального пожарного риска с 01. 09. 2023 года должна выполняться в соответствии с Приказом МЧС России от 14. 11. 2022 г. № 1140 [16].

Для адаптации системы подготовки специалистов в 2022 году обновлен профессиональный стандарт специалиста по пожарной профилактике, который содержит требования к выполняемым трудовым функциям и уровню профессиональной подготовки [17] и предполагает владение специалистами с высоким уровнем подготовки вопросами оценки и менеджмента пожарных рисков.

Проблематичным представляется применение Приказа МЧС России от 15. 11. 2022 г. № 1161 «Об утверждении Порядка согласования стандартов организации, содержащих требования пожарной безопасности» [18].

Традиционно стандарты организации (СТО) разрабатываются на действия по управлению, измерениям, контролю, порядку передачи продукции по технологической цепочке. А вот на новую продукцию или новые технические решения, как следует из Приказа [18] разрабатываются технические условия (ТУ). Они необходимы при отсутствии национального или межгосударственного стандарта

на конкретный вид продукции (часто новой) или при необходимости уточнить требования существующих стандартов. Именно через ТУ, разработанные изготовителем, согласованные и утвержденные в установленном порядке, реализуются требования технических регламентов и стандартов, являющиеся нормативной базой при подтверждении соответствия. Существует отработанная процедура экспертизы и регистрации ТУ техническими комитетами по стандартизации. Процедура согласования СТО специальной комиссией МЧС России в соответствии с Приказом [18] не вполне понятна с позиции традиционной стандартизации.

### Вывод

В качестве перспективной задачи профильных образовательных организаций и крупных информационных систем можно предложить формирование обучающих программ по направлению «Менеджмент пожарной безопасности» для предприятий и проектных организаций.

При подготовке по предлагаемым программам должны учитываться специфика деятельности и связанных с ней требований пожарной безопасности слушателей, а также их исходный уровень знаний в области пожарной безопасности. Подготовка будет направлена на формирование у руководителей разного уровня современных представлений о системе обеспечения пожарной безопасности и ее документации в организации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононенко Е.В. и др. Развитие понятия риска в сфере управления безопасностью на современном этапе // Техносферная безопасность. – 2021. – № 1 (30). – С. 94-100.
2. Об обязательных требованиях в Российской Федерации: федер. закон Российской Федерации от 31.07.2020 № 247-ФЗ (ред. от 11.06.2021).
3. О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации: федер. закон Российской Федерации от 31.07.2020 № 248-ФЗ (ред. от 06.12.2021).
4. Программа профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в области пожарной безопасности при осуществлении федерального государственного лицензионного контроля (надзора) за деятельностью по монтажу, техническому обслуживанию и ремонту средств обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений и федерального государственного лицензионного контроля (надзора) за деятельностью по тушению пожаров в населенных пунктах, на производственных объектах и объектах инфраструктуры на 2023 год.
5. Распоряжение МЧС России от 07.12.2022 № 1345 «Об утверждении Программы профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в области пожарной безопасности при осуществлении федерального государственного пожарного надзора органами государственного пожарного надзора на 2023 год».
6. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA) // ASQ («American Society for Quality») : [сайт]. – 2022. – URL: <https://asq.org/quality-resources/fmea>
7. ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812-2018) «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов».
8. Распоряжение Правительства РФ от 02.03.2021 № 519-р «О реорганизации федерального государственного унитарного предприятия «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия».
9. ГОСТ Р МЭК 31010-2021 «Надежность в технике. Методы оценки риска».
10. Технический регламент Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» (ТР ЕАЭС 043/2017) от 23.06.2017 г. № 40.
11. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 14.07.2022 г.).
12. Распоряжение Правительства РФ 29.12.2020 № 3646-р «Список продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в ред. от 15.07.2021 № 1951-р).

13. ГОСТ Р 53603-2020 «Оценка соответствия. Схемы сертификации продукции в Российской Федерации».
14. ГОСТ Р 54008-2022 «Оценка соответствия. Схемы декларирования соответствия».
15. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 18.04.2018 № 44 (ред. от 15.07.2022) «О типовых схемах оценки соответствия».
16. Технический регламент ЕАЭС «О безопасности строительных материалов и изделий» (проект Технического регламента).
17. Постановление Правительства РФ от 25.06.2021 № 1016 «О внесении изменений в Положение о федеральном государственном пожарном надзоре».
18. Постановление Правительства РФ от 26.05.2018 № 602 «Об аттестации должностных лиц, осуществляющих деятельность в области оценки пожарного риска» (в редакции ПП РФ от 10.07.2020 № 1017).
19. Постановления Правительства РФ от 22.07.2020 № 1084 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска».
20. Постановление Правительства РФ от 31.08.2020 № 1325 «Об утверждении Правил оценки соответствия объектов защиты (продукции установленным требованиям пожарной безопасности путем независимой оценки пожарного риска».
21. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 11.10.2021 № 696н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по пожарной профилактике».
22. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества».
23. ГОСТ Р ИСО 19011-2021 «Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента».
24. ГОСТ Р ИСО 9004-2019 «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации».
25. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2022 «Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы».

#### REFERENCES

1. Kononenko E.V. et al. Development of the concept of risk in the field of security management at the present stage. *Technosfernaya bezopasnost'*. 2021; 1 (30): 94–100. (rus).
2. On mandatory requirements in the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation. July 31<sup>st</sup>, 2020; No. 247-FZ. (rus).
3. On state control (supervision) and municipal control in the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation No. 248-FZ dated July 31<sup>st</sup>, 2020. (rus).
4. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia "The program for the prevention of risks of causing harm (damage) to legally protected assets in the field of fire safety in the implementation of federal state license control (supervision) over the installation, maintenance and repair of fire safety equipment for buildings and structures and federal state license control (supervision) for activities to extinguish fires in settlements, at production facilities and infrastructure facilities for 2023". 14.12.2022; 1381. (rus).
5. Decree of the EMERCOM of Russia "On approval of the Program for the prevention of risks of causing harm (damage) to legally protected assets in the field of fire safety in the implementation of federal state fire supervision by state fire supervision bodies for 2023". 07.12.2022; 1345. (rus).
6. Analysis of the types, consequences and causes of potential nonconformities (FMEA). American Society for Quality. 2022. URL: <https://asq.org/quality-resources/fmea>. (rus).
7. GOST R 27.303-2021 (IEC 60812-2018) "Dependability in technics. Analysis of the types and consequences of failures". (rus).
8. Decree of the Government of the Russian Federation "On the reorganization of the federal state unitary enterprise "Russian scientific and technical information center for standardization, metrology and conformity assessment". 02.03.2021; 519-r. (rus).
9. GOST R IEC 31010-2021 "Dependability in technics. Risk assessment methods". (rus).
10. Technical Regulations of the Eurasian Economic Union "On the requirements for fire safety and fire extinguishing equipment" (TR EAEU 043/2017). 32.06.2017; 40. (rus).
11. Technical regulations on fire safety requirements: Federal Law of the Russian Federation. 22.07.2008; 123-FZ. (rus).
12. Decree of the Government of the Russian Federation "List of products, subject to mandatory confirmation of compliance with the requirements of the Federal Law "Technical regulations on fire safety requirements". 29.12.2020; 3646-r. (as amended on July 15<sup>th</sup>, 2021 No. 1951-r). (rus).

13. GOST R 53603-2020 "Conformity assessment. Product certification schemes in the Russian Federation".
14. GOST R 54008-2022 "Conformity assessment. Conformity Declaration Schemes".
15. Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission. 18.04.2018; 44. (rus).
16. Technical regulation of the EAEU "On the safety of building materials and products" (draft of the Technical regulation) (rus).
17. Decree of the Government of the Russian Federation "On amendments to the regulations on the federal state fire supervision". 25.06.2021; 1016. (rus).
18. Decree of the Government of the Russian Federation "On the certification of officials carrying out activities in the field of fire risk assessment". 26.05.2018; 602. (rus).
19. Decree of the Government of the Russian Federation "On the procedure for conducting fire risk assessment calculations". 24.07.2020; 1084. (rus).
20. Decree of the Government of the Russian Federation "On approval of the rules for assessing the conformity of protected objects (products) with the established fire safety requirements by using the independent fire risk assessment". 31.08.2020; 1325. (rus).
21. Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation "On approval of the professional standard "Specialist in fire prevention". 11.10.2021; 696n. (rus).
22. GOST R ISO 9001-2015 "Quality management systems".(rus).
23. GOST R ISO 19011-2021 "Guidelines for auditing management systems". (rus).
24. GOST R ISO 9004-2019 "Quality management. The quality of the organization. Guidance for achieving sustained organizational success". (rus).
25. GOST R ISO 7870-1-2022 "Statistical methods. Control charts. Part 1. General principles". (rus).

#### Информация об авторах

**Кононенко Елена Венедиктовна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 88693; e-mail: [ekononenko51@mail.ru](mailto:ekononenko51@mail.ru)

**Мокроусова Ольга Анатольевна**, доктор педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой пожарной безопасности в строительстве, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 827347; e-mail: [olgamokrousova@mail.ru](mailto:olgamokrousova@mail.ru)

**Черкасский Григорий Александрович**, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 846467; e-mail: [gregor2003@mail.ru](mailto:gregor2003@mail.ru)

#### Information about the authors

**Elena V. Kononenko**, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Fire Safety in Construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 88693; e-mail: [ekononenko51@mail.ru](mailto:ekononenko51@mail.ru)

**Olga A. Mokrousova**, doctor of Pedagogical Sciences, Associate, Professor Head of the Department of Fire Safety in Construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; RISC ID 827347; e-mail: [olgamokrousova@mail.ru](mailto:olgamokrousova@mail.ru)

**Grigory A. Cherkassky**, senior Lecturer, Department of Fire Safety in Construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; RISC ID 846467; e-mail: [gregor2003@mail.ru](mailto:gregor2003@mail.ru)

**Миронов Андрей Николаевич**, магистрант кафедры пожарной безопасности в строительстве, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22;  
e-mail: [miron.man@mail.ru](mailto:miron.man@mail.ru)

**Andrey N. Mironov**, master student of the Department of Fire Safety in Construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation;  
e-mail: [miron.man@mail.ru](mailto:miron.man@mail.ru)



УДК: 614.838

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МОДУЛЬНЫХ ГАЗОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Тимофеев Артем Борисович

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

### АННОТАЦИЯ

В статье описана методика проведения натурных наблюдений по расположению автомобилей перед их заправкой на расстояниях от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа на модульной автомобильной газозаправочной станции. Целью теоретического исследования является установление минимального среднего расстояния расположения автомобиля от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа, как наиболее опасного сценария развития пожара, влияющего на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа до наступления критической поверхностной температуры. Методом математической статистики обработки данных определены вариационные ряды с разрядными частотами распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара сжиженного углеводородного газа, определена достаточность количества наблюдений. Построена гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа. Построена компьютерная модель в программном комплексе Fire Dynamic Simulator и проведено численное моделирование горения автомобиля на основе полевого математического моделирования пожара. Результаты численного моделирования с учетом расположения автомобиля относительно резервуара показали необходимость дальнейших исследований влияния климатических условий на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа для определения безопасных расстояний между резервуаром и газозаправочной колонкой.

**Ключевые слова:** модульная газозаправочная станция, безопасные расстояния, резервуар, автомобиль, пожарная безопасность

### FIRE HAZARD STUDY OF MODULAR GAS FILLING STATIONS

Artem B. Timofeev

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

The article describes the methodology for conducting field observations on the location of vehicles before refueling at distances from the storage tank for liquefied petroleum gas at a modular automobile gas filling station. The purpose of the theoretical study

is to establish the minimum average distance of the vehicle from the storage tank of liquefied petroleum gas, as the most dangerous scenario for the development of a fire that affects the heating of the side wall of the tank of liquefied hydrocarbon gas to the critical surface temperature. Using the method of mathematical statistics of data processing, variation series with bit frequencies of the distribution of the number of cars at a distance from the liquefied petroleum gas reservoir were determined, and the sufficiency of the number of observations was determined. A histogram and a polygon for the distribution of the number of cars at a distance from the storage tank for liquefied petroleum gas have been constructed. A computer model was built in the Fire Dynamic Simulator software package and a numerical simulation of a car burning was carried out on the basis of a field mathematical simulation of a fire. The results of numerical modeling, taking into account the location of the car relative to the tank, showed the need for further research into the influence of climatic conditions on the heating of the side wall of the liquefied hydrocarbon gas tank in order to determine the safe distances between the tank and the gas dispenser.

**Keywords:** modular gas filling station, safe distances, tank, car, fire safety

### Введение

Проведенный анализ нормативных документов в области пожарной безопасности показал, что проектирование в части противопожарных расстояний между технологическим оборудованием модульной автомобильной газозаправочной станции, зданиями, сооружениями и технологическим оборудованием как на территории автомобильной заправочной станции (далее – АЗС), так и за ее пределами отсутствует [1, 2].

Исследования огневого воздействия на прогрев стенок резервуара сжиженного углеводородного газа (далее – СУГ) при горении автомобиля, в том числе с учетом климатических условий регионов России отсутствуют [3–13]. В результате чего необходимо проведение натурных наблюдений по расположению автомобилей перед его заправкой на расстояниях от резервуара хранения СУГ с целью установления минимального среднего расстояния и дальнейшего проведения экспериментальных исследований влияния воздействия температурного поля на прогрев

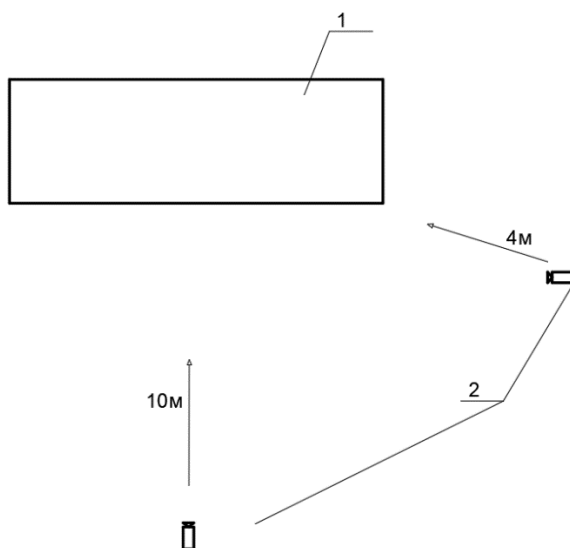
боковой стенки резервуара СУГ. Результаты моделирования показали, что огневое воздействие на боковую стенку резервуара СУГ на расстоянии 1 м при горении автомобиля приведет к его перегреву и взрыву.

### Материалы и методы

Натурные наблюдения проводились на девяти модульных автомобильных газозаправочных станциях (далее – АГЗС) методом видеонаблюдения [14].

Для фиксации расположения автомобилей относительно резервуара СУГ использовались две экшен-камеры Xiaomi модель YDXJ01FM, установленные на штатив с фронтальной и боковой стороны (рис. 1). На асфальте наносилась линейная разметка строительной рулеткой (рис. 2). Для калибровки изображения на мониторе персонального компьютера была построена сетка из прозрачной пленки, соответствующая размерностям нанесенной на асфальт линейной разметки.

Полученные видеоматериалы обрабатывались покадровым изображением с помощью программы QuickTime.



**Рис.1.** Схема расположения камер относительно резервуара СУГ

**Fig. 1.** The layout of the chambers relative to the LPG tank



**Рис. 2.** Линейная разметка для фотофиксации

**Fig. 2.** Linear markings for photo fixation

### Результаты исследования

Всего было зафиксировано и обработано 450 наблюдений, объем выборочной совокупности данных для установления среднего минимального расстояния

между резервуаром СУГ и автомобилем сводится в табл. 1.

Методом математической статистики обработки данных с помощью программы Excel проведена их систематизация, результаты сводятся в табл. 2.

Таблица 1. Объем выборочной совокупности данных наблюдений

Table 1. Sample size of observational data

АЗС №1 Gas station №1	АЗС №2 Gas station №2	АЗС №3 Gas station №3	АЗС №4 Gas station №4	АЗС №5 Gas station №5	АЗС №6 Gas station №6	АЗС №7 Gas station №7	АЗС №8 Gas station №8	АЗС №9 Gas station №9
0,9	0,9	1,0	1,1	1,4	1,8	2,0	2,5	3,0
1,5	2,6	2,4	0,9	1,2	1,7	1,1	1,6	2,5
1,3	2,4	2,2	1,1	1,0	1,5	0,9	1,4	2,3
1,1	2,2	2,0	1,3	0,9	1,3	1,1	1,7	2,1
0,9	2,0	1,8	1,5	1,2	1,7	1,3	1,5	1,9
1,1	1,8	1,6	1,7	1,5	2,1	1,5	1,3	1,7
1,3	1,6	1,4	1,9	1,8	2,5	1,7	1,1	1,5
1,5	1,4	1,2	2,1	2,1	2,9	1,9	0,9	1,3
1,7	1,2	1,0	2,3	2,4	2,8	2,1	1,3	1,8
1,9	1,0	1,3	2,4	2,5	2,6	2,3	1,1	1,6
2,1	1,3	1,6	2,5	2,3	2,5	2,5	0,9	1,4
2,3	1,5	1,9	2,6	2,4	2,3	2,7	1,1	1,2
2,5	1,8	2,2	2,7	2,5	2,2	2,6	1,3	1,0
2,7	2,0	2,5	2,8	2,6	2,0	2,4	1,4	1,3
2,9	2,3	2,8	2,9	2,7	1,9	2,3	1,6	1,6
2,8	2,5	3,1	3,0	2,8	1,7	2,2	1,8	1,9
2,7	2,8	2,9	3,1	2,9	1,6	2,1	2,0	2,2
2,6	2,5	2,7	2,9	3,0	1,4	1,9	2,2	2,5
2,5	2,2	2,5	2,7	3,1	1,3	1,8	2,3	2,8
2,4	1,9	2,3	2,5	2,9	1,1	1,7	2,5	2,7
2,3	1,6	2,1	2,3	2,7	1,0	1,5	2,7	2,6
2,2	1,3	1,9	2,1	2,5	1,2	1,4	2,9	2,5
2,1	1,0	1,7	1,9	2,3	1,4	1,3	3,1	2,4
2,0	1,2	1,5	1,7	2,1	1,6	1,1	2,9	2,3
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,0	2,7	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	2,9	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	3,1	2,6
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	2,8	2,8
2,3	2,2	2,1	2,3	2,7	2,6	1,8	2,5	3,0
2,5	2,4	2,3	2,5	2,9	2,8	2,0	2,2	2,9
2,4	2,3	2,2	2,4	2,8	2,7	1,9	2,1	2,8
2,3	2,2	2,1	2,3	2,7	2,6	1,8	2,0	2,7
2,2	2,1	2,0	2,2	2,6	2,5	1,7	1,9	2,6
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	1,8	2,5
2,0	1,9	1,8	2,0	2,4	2,3	1,5	1,7	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3
1,8	1,7	1,6	1,8	2,2	2,1	1,3	1,5	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	1,4	2,1
1,6	1,5	1,4	1,6	2,0	1,9	1,1	1,3	2,0
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,0	1,2	1,9

АЗС №1 Gas station №1	АЗС №2 Gas station №2	АЗС №3 Gas station №3	АЗС №4 Gas station №4	АЗС №5 Gas station №5	АЗС №6 Gas station №6	АЗС №7 Gas station №7	АЗС №8 Gas station №8	АЗС №9 Gas station №9
1,4	1,3	1,2	1,4	1,8	1,7	1,3	1,1	1,8
1,3	1,2	1,1	1,3	1,7	1,6	0,9	1,0	1,7
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3
1,8	1,7	1,6	1,8	2,2	2,1	1,3	1,5	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	1,4	2,1
1,6	1,5	1,4	1,6	2,0	1,9	1,5	1,3	2,0
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,1	1,2	1,9
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	1,8	2,5
2,0	1,9	1,8	2,0	2,4	2,3	1,5	1,7	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3

**Таблица 2.** Описательная статистика обработки данных  
**Table 2.** Descriptive statistics of data processing

Показатель Indicator	Значение Value
Среднее Average	1,900
Медиана Median	1,900
Мода Mode	2,100
Стандартное отклонение Standard deviation	0,534
Дисперсия выборки Sample variance	0,286
Экцесс Excess	- 0,801
Асимметричность Asymmetry	0,108
Интервал Interval	2,200
Минимум Minimum	0,900
Максимум Maximum	3,100

Достаточность количества наблюдений со степенью уверенности величиной 0,95 и допустимой ошибкой 0,05 определяется по формуле (1) [15]:

$$n = \frac{(x \cdot \vartheta)^2}{\varepsilon^2} = \frac{(1,96 \cdot 28,1)^2}{5^2} \approx 122, \quad (1)$$

где  $x$  – коэффициент доверительной вероятности  $P(x)$ , для  $P(0,95) = 1,96$ ;  $\vartheta$  – значение меры изменчивости

$$\vartheta = (\sigma/X) \cdot 100\% = (0,534/1,9) \cdot 100\% = 28,1,$$

представляющее собой выраженное в процентах отношение среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) выборки к среднему арифметическому значению ( $\bar{X}$ );  $\varepsilon$  – показатель точности наблюдений, равный допустимой ошибке, не превышающей 5 %.

Результаты первичной обработки данных показали, что количество проведенных натурных наблюдений позволяет получить достоверный результат с вероятностью 0,95.

Для построения распределения количества автомобилей на расстояниях

от резервуара СУГ определяется количество вариационных рядов по формуле Стерджесса (2);

$$k = 1 + 3,322 \cdot \lg 450 = 10 \quad (2)$$

При этом длина интервалов вариационных рядов определяется как отношение размаха вариации, равное 2,2, на количество интервалов вариации, равное 10, что составит 0,22 (округляется до 0,25).

Для визуализации распределения значений выборки наблюдений по интервалам вариационных рядов подсчитывается количество значений, попавших в тот или иной интервал и ставится черточка, результаты сводятся в табл. 3.

**Таблица 3.** Распределение наблюдаемых значений по расстояниям

**Table 3.** Distribution of observed values by distances

№ No	Интервалы, м Intervals, m	Среднее значение, м Average value, m	Подсчет отдельных значений Counting individual values	Частота Frequency
1	0,85 – 1,10	0,98		28
2	1,10 – 1,35	1,23		49
3	1,35 – 1,60	1,48		65
4	1,60 – 1,85	1,73		65
5	1,85 – 2,10	1,98		82
6	2,10 – 2,35	2,23		55
7	2,35 – 2,60	2,48		56
8	2,60 – 2,85	2,73		29
9	2,85 – 3,10	2,98		18
10	3,10 – 3,35	3,23		3
				$\Sigma = 450$

По подсчитанным частотам распределения наблюдательных значений строится гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ (рис. 3).

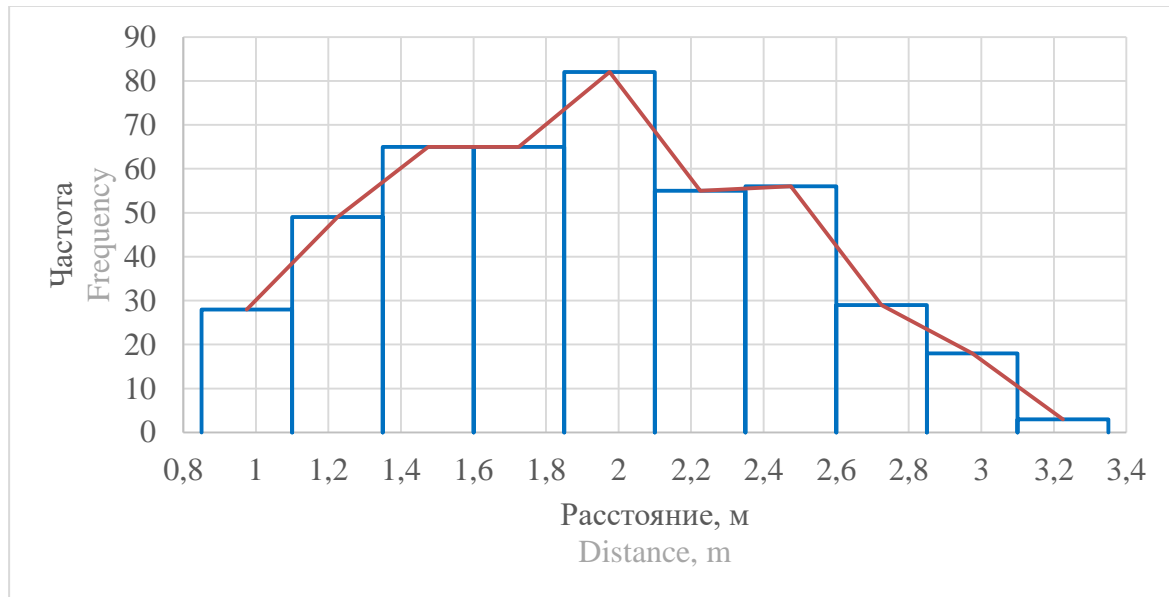
Статистическая обработка данных наблюдений показала, что минимальное

среднее значение расстояния между автомобилем и резервуаром СУГ составляет 0,98 м, в дальнейших теоретических исследованиях принимается расстояние 1 м.

По полученным исходным данным по расположению автомобиля на расстоя-

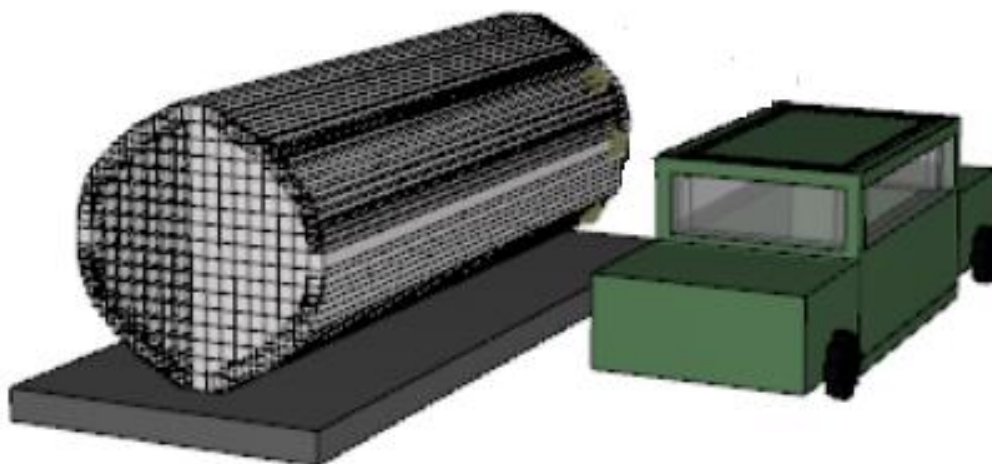
нии 1 м от резервуара СУГ создается компьютерная модель в программном комплексе FDS с использованием вычислительной гидрогазодинамики на основе полевого математического моделирования пожара, основой которой являются закон сохранения массы, энергии и импульса (рис. 4).

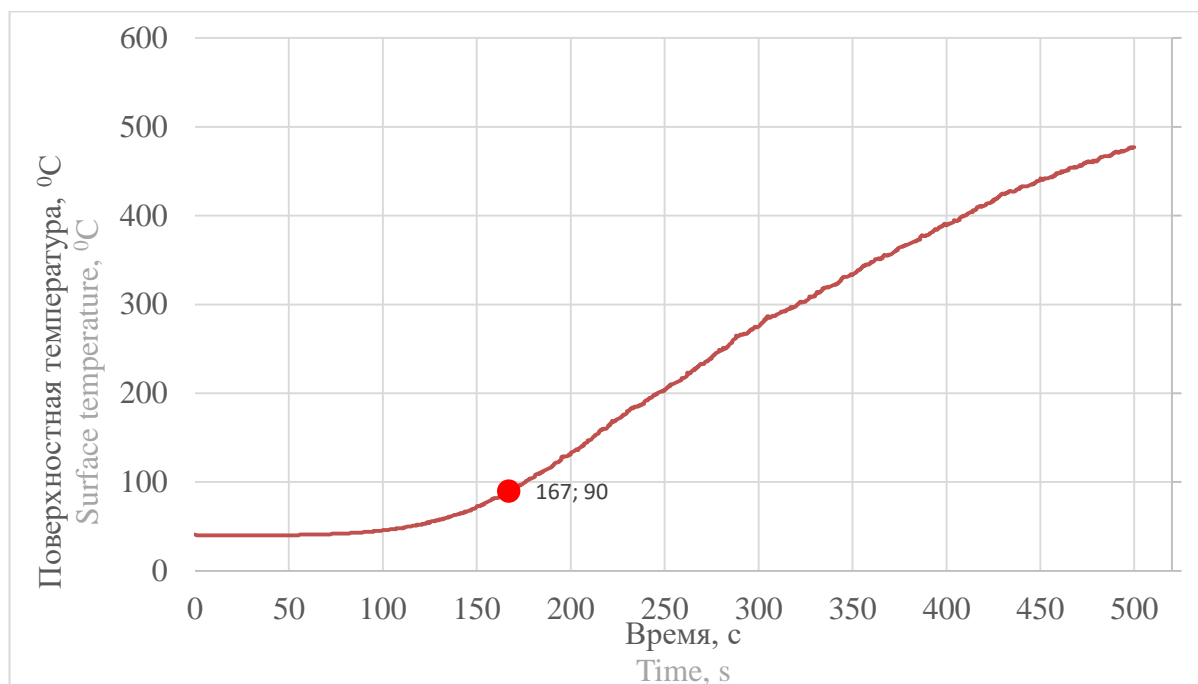
Результаты моделирования показали (рис. 5), что огневое воздействие на боковую стенку резервуара СУГ на расстоянии 1 м при горении автомобиля приведет к его перегреву и взрыву через 167 секунд, что определяет дальнейшее направление исследования по повышению безопасности людей на модульной АГЗС [16].



**Рис. 3.** Гистограмма распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ

**Fig. 3.** Histogram of the distribution of the number of cars at a distance from the LPG tank



**Рис. 4.** Компьютерная модель модульной АГЗС**Fig. 4.** Computer model of a modular gas filling station**Рис. 5.** График прогрева боковой стенки резервуара СУГ**Fig. 5.** Schedule of heating the side wall of the LPG tank

### Заключение

На основании проведенных теоретических исследований сделаны следующие выводы.

1. Анализ литературных источников показал, что нормы проектирования модульных АГЗС в части противопожарных расстояний отсутствуют, и исследования огневого воздействия на резервуар СУГ при горении автомобиля не проводились.

2. Полученные методом видеонаблюдения 450 значений по расположению автомобилей относительно резервуара СУГ структурированы и обработаны статистическим методом с подтверждением достаточности количества наблюдений со степенью уверенности в 95 %.

3. Построенная гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ

показывает, что выборка данных подчиняется нормальному закону распределения Гаусса, при этом минимальное среднее значение расстояния между автомобилем и резервуаром СУГ составляет 1 м, которое будет использовано в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях как сценарий развития пожара при горении автомобиля.

4. Результаты моделирования с учетом полученных данных по расположению автомобиля на расстоянии 1 м от резервуара СУГ показали, что критическая поверхностная температура наступает через 167 секунд, после чего произойдет взрыв. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований по определению безопасных расстояний между резервуаром СУГ и газозаправочной колонкой (размещения автомобиля), в том числе с учетом климатических условий.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Парфененко А. П., Тимофеев А. Б. Проблемы нормирования противопожарных расстояний на территории многопливных автозаправочных станций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 99–103.
2. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1001(1), Pp. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068.
3. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank // Journal of Hazardous Materials, 1988, Vol. 20, Pp. 55–71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7.
4. Droste B., Schoen W. Full-Scale Fire Tests with Unprotected and Thermal Insulated LPG Storage Tanks // Journal of Hazardous Materials, 1988, Vol. 20. Pp. 41-53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8.
5. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks // In: 6th International Loss Prevention Symposium “Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries” [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)], 1989, Vol. IV, Pp. 51-1-17.
6. Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings // Fire Technology. 1992. Vol. 28. Pp. 257-269. DOI: 10.1007/BF01857695.
7. Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, Vol. 26(6). Pp. 1484-1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015.
8. Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank // Fire Safety Journal, 2013, Vol.61. Pp. 100-107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.003.
9. Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires // Process Safety and Environmental Protection, 2017, Vol. 114. Pp. 251-270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013.
10. Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface // Process Safety and Environmental Protection, 2021, Vol.147. Pp. 693-702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002.
11. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени / В. Н. Филиппов, Ю. Н. Шебеко, В. М. Пономарев и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 11. С. 41–51.
12. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В. Н. Филиппов, В. Г. Попов, С. В. Беспалько и др // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 10. С. 43–49.
13. Костюхин А. Н. Исследование и усовершенствование способов противопожарной защиты баллонов со сжиженными углеводородными газами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 161 с.
14. Шубникова И. С., Палагута К. А. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению // Надежность и качество : труды междунар. симпозиума. Пенза : Издательство ПГУ, 2013. Т. 1. С. 352–355.
15. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., 1971. 576 с.
16. Парфененко А. П., Тимофеев А. Б. Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 6. С. 68–77.

## REFERENCES

1. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Problems of fire-fighting distance on the territory of multi-fuel filling stations. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021; 2(36):99-103. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46288950> (rus).
2. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 1001(1):1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068.
3. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank. Journal of Hazardous Materials. 1988; 20:55–71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7.
4. Droste B., Schoen W. Full-Scale Fire Tests with Unprotected and Thermal Insulated LPG Storage Tanks. Journal of Hazardous Materials. 1988; 20:41-53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8.
5. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks. In: 6th International Loss Prevention Symposium “Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries” [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]. 1989; IV:51-1-17.
6. Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings. Fire Technology. 1992; 28:257–269. DOI: 10.1007/BF01857695.

7. Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(6):1484–1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015.
8. Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank. *Fire Safety Journal*. 2013; 61:100–107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.003.
9. Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 114:251–270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013.
10. Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 147:693–702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002.
11. Filippov V.N., Shebeko Yu.N., Ponomarev V.M., Navtsenya V.Yu., Bepalco S.V., Plitsina O.V. Modeling of the behavior of the railway LPG tank in the hearth flame. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):41–51 (rus).
12. Filippov V.N., Popov V.G., Bepalco S.V., Shebeko Yu.N., Navtsenya V.Yu. Results of complex researches of fire and explosion safety of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49 (rus).
13. Kostyukhin A.N. Research and improvement of methods of fire protection of cylinders with liquefied petroleum gases. *Cand. techn. sci. Diss. Moscow, 2010; 161. (rus)*.
14. Shubnikova I.S., Palaguta K.A. Analysis of methods and algorithms for determining the parameters of an object and the distance to it from the image. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2013; 1:352–355 (rus).
15. Mitropolsky A.K. *Technique of statistical calculations*. Science, 1971; 576. (rus)
16. Parfenenko A.P., Timofeev A.B. A study on the influence of climatic conditions on the heating of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):68–77. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.68-77 (rus).

#### Информация об авторе

**Тимофеев Артем Борисович**, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID 0000-0001-6645-4302; AUTHOR ID 1073991; e-mail: [timofeev-ab@list.ru](mailto:timofeev-ab@list.ru)

#### Information about the authors

**Artem B. Timofeev**, Graduate Student of the Department of Integrated Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26; ORCID: 0000-0001-6645-4302; AUTHOR ID: 1073991; e-mail: [timofeev-ab@list.ru](mailto:timofeev-ab@list.ru)

УДК 614.847

## ОЦЕНКА ОБРАЗЦОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

**Логинов Валерий Викторович, Вишняков Александр Валерьевич,  
Зубарев Игорь Александрович**

Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы применения метода анализа иерархий для сравнения комплекса характеристик разрабатываемого образца робототехники пожаротушения с характеристиками штатных образцов пожарной техники без средств роботизации, находящейся на вооружении пожарных частей (далее – штатная техника), и экспериментальных (несерийных) образцов робототехники, находящихся в опытной эксплуатации. На основе результатов его применения, сделан вывод о целесообразности его использования при оценке образцов робототехнических комплексов.

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, робототехнический комплекс, пожаротушение, шкала отношений, эффективность применения, качество работы эксперта

## EVALUATION OF SAMPLES OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS BY THE ANALYSIS OF HIERARCHIES

**Valery V. Loginov, Alexander V. Vishnyakov, Igor A. Zubarev**

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

### ABSTRACT

The article deals with the application of the hierarchy analysis method to compare the complex of characteristics of the robotics sample being developed with the characteristics of pants-type models of equipment without robotic means, which is in service with fire departments (hereinafter, standard equipment) and experimental (non-serial) samples of robotics that are in trial operation. Based on the results of its application, comparing samples, it was concluded that it is expedient to use it when evaluating samples of robotic systems.

**Keywords:** firefighting, hierarchy analysis method, robotic complex, firefighting, relationship scale, application efficiency, expert work quality

### Введение

На этапе проектирования робототехнического комплекса (РТК) в него закладываются определенные технические

характеристики, реализация которых в промышленном образце, пригодном для

эксплуатации в реальных условиях, позволяет ему выполнять задачи с той или иной степенью эффективности.

В техническом задании на разработку РТК пожаротушения на этапе проектирования закладываются характеристики определяющие его возможности по борьбе с огнем. Эти характеристики взаимосвязаны, и с технической точки зрения при проектировании можно отдавать приоритет определенной, но увязанной с остальными характеристике.

Чтобы говорить о разработке РТК для выполнения задач пожаротушения с определенными характеристиками, требуется сравнить комплекс этих характеристик с аналогичными характеристиками штатной пожарной техники, а также для ответа на вопрос: есть ли смысл серийного промышленного производства РТК, если задача может быть выполнена штатным образцом? Также важной представляется задача сравнения характеристик, и, следовательно, возможностей разработанных и прошедших опытную эксплуатацию РТК с характеристиками и возможностями, закладываемыми в разрабатываемые образцы.

Для решения задач выбора приоритетных характеристик, определяющих основные характеристики образца, а также характеристик, определяющих другие функциональные свойства (взаимосвязанных с приоритетными и часто взаимоисключающих друг друга), требуется методика объективного сравнения характеристик для их выбора и последующей реализации в реальном образце, пригодном к опытной эксплуатации.

Учитывая очень ограниченный, по сравнению с использованием штатной техники, опыт эксплуатации экспериментальных РТК и естественное отсутствие практики применения разрабатываемых образцов, их сравнение возможно только

на основе экспертных методов, при которых на основе согласованного анализа и его последующей обработки осуществляется дифференцированный выбор определяющих характеристик и параметров, закладываемых в техническое задание на разработку РТК.

Решение такой задачи требует системного подхода, четкого представления о цели выбора и установления связи между отдельными характеристиками. Трудность решения будет также заключаться в объединении критериев оценки и условий применения в общую систему зависимостей. С математической точки зрения методический инструментарий этого решения должен быть достаточно простым, но с однозначным ответом о выборе приоритетных характеристик, позволяющим сделать заключение об эффективности проводимой работы по проектированию новых образцов РТК.

#### **Применение метода анализа иерархий для оценки образцов и его результаты**

Одним из вариантов решения данной задачи может стать применение метода анализа иерархий (МАИ) [1] для сравнения различных образцов РТК, в том числе и проектируемых по прогнозированию эффективности применения в сравнении со штатными образцами.

Сразу нужно сказать о достаточно критическом подходе некоторых авторов [2, 3] к МАИ и определенной неоднозначности получаемых результатов. Действительно, в основе критериев оценки МАИ лежит иерархия критериев, формируемая, хотя и согласованная, но все же субъективным мнением экспертов, и подчиненные иерархии критериев альтернативы тоже будут иметь субъективность, зависящую от экспертного мнения. При этом применение МАИ как метода сравнения альтернатив под сомнение не ставится и активно защищается многими авторами [4].

Для объективного сравнения эффективности применения РТК и штатной техники необходим анализ отношения событий (эпизодов) успешного применения РТК в определенных условиях к общему применению техники для выполнения задач пожаротушения, применительно к этим условиям (или максимально близких к ним). Учитывая, что практика является критерием истины, такие эпизоды должны быть достаточно многочисленными. К сожалению, приходится констатировать, что современный уровень развития РТК [5] не позволяет провести такое сравнение и что метод МАИ для оценки эффективности применения различных образцов РТК на этапе проектирования и опытной эксплуатации является приемлемым для определения основных приоритетных характеристик, закладываемых в конструкцию.

Методология применения МАИ хорошо описана в литературе и в основном касается процессов принятия решений по выбору альтернатив, оцениваемых по шкале предпочтений, согласно которой группа экспертов субъективно оценивает тот или иной вариант выбора. Метод нашел широкое применение при обосновании принятия решений не только в экономической и управленческой области, но и в вопросах обеспечения безопасности и управления спасательными подразделениями [6, 7]. Есть примеры использования метода и при оценке технических систем [8].

В Уральском институте ГПС МЧС России на кафедре пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств было проведено исследование оценки перспективного РТК по выполнению типовых задач пожаротушения в сравнении со штатным и имеющимся опытным образцом РТК. Исследование было основано на применении МАИ. Целью исследования была в том

числе попытка апробации МАИ для сравнения характеристик образцов.

В проведенном исследовании целью ставилось определение комплекса наиболее сбалансированных характеристик образца РТК для выполнения типичных задач пожаротушения. Под термином «типичные» подразумевались задачи, которые способны быть выполнены линейными подразделениями пожарной охраны со штатной техникой. Исследование также должно было дать ответ: какими характеристиками должен обладать РТК, предназначенный для линейных частей пожарной охраны?

Образцы штатной техники и РТК оценивались экспертами по критериям:

- Стоимости. В процессе согласования мнения экспертов, принято допущение оценки по этому параметру не опытных, а серийных образцов, предлагаемых к производству (критерий 1);
- быстроты развертывания (критерий 2);
- количество личного состава для развертывания и работы (критерий 3);
- надежности работы и выполнения задачи (критерий 4);
- время выполнения задачи (критерий 5);
- безопасность работы расчета (критерий 6).

Альтернативами достижения целей были определены штатный образец пожарной техники (образец 1), существующий образец РТК типа «Ель-10», с определенными условностями, ввиду недостаточности информации о нем (образец 2), перспективный РТК, характеристики которого принимались априори лучшими, чем двух первых образцов, но подвергались сглаживанию для получения согласованного мнения экспертов (образец 3).

Матрица приоритетов (табл. 1) была сформирована попарным сравнением

оценки критериев, согласно фундаментальной шкале экспертных предпочтений [1] (табл. 2) соотношения факторов, являющейся стандартной при использовании МАИ.

При формировании матрицы приоритетов учитывалось, что  $w_{ij} \times w_{ji} = 1$ , что означает, что матрица является обратно-симметричной.

При вычислении локальных векторов приоритетов проводилось сравнение веса критериев  $w_{ij}$  элемента оценки на относительный вес общего множества элементов.

Компоненты собственного вектора матрицы для каждой строки вычислялись по формуле:

$$w_{i1} \times w_{i2} \times \dots \times w_{iN} = a'_i \quad (1)$$

**Таблица 1.** Матрица приоритетов

**Table 1.** Priority Matrix

Критерий Criterion	1	2	3	4	5	6	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	3,00	2,00	5,00	3,00	9,00	0,4031142
2	0,33	1,00	0,50	5,00	2,00	1,00	0,1437657
3	0,50	2,00	1,00	5,00	3,00	2,00	0,2327381
4	0,20	0,20	0,20	1,00	3,00	1,00	0,0709114
5	0,33	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	0,0679123
6	0,11	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	0,0815584
Итого: Total:	2,48	7,70	4,53	17,33	13,00	15,00	1

Каждому компоненту  $a'_i$  вычислялось соответствующее геометрическое среднее ее элементов, рассчитанное по формуле (2):

$$a_i = \sqrt[n]{a'_i} \quad (2)$$

Значение локального вектора приоритетов для каждого из критериев было рассчитано по формуле (3):

$$X_i = a_i / \sum_{j=1}^n a_j, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

Проверка данной таблицы на согласованность, проводилась вычислением индекса согласованности (ИС) по формуле (4):

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{max}$  максимальное или главное собственное значение матрицы (5):

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n w_{1j} X_1 + \sum_{j=1}^n w_{2j} X_2 + \dots + \sum_{j=1}^n w_{nj} X_n \quad (5)$$

В нашем случае результат ИС равен 0,099, что позволяет, используя данные таблицы случайной согласованности (СС) (табл. 3) для размерности матрицы 6, составляющей 1,24, найти отношение согласованности (ОС) мнений экспертов.

Таблица 2. Шкала экспертных предпочтений

Table 2. Scale of expert preferences

$w_{ij}$	Оценка по шкале важности Importance rating
1	Равная значительность элементов $i$ -го и $j$ -го элемента Equal significance of the elements of the $i$ -th and $j$ -th element
3	Незначительная важность элемента $i$ перед $j$ Minor importance of element $i$ before $j$
5	Значительная важность элемента $i$ перед $j$ Significant importance of element $i$ before $j$
7	Явная значимость элемента $i$ перед $j$ Explicit importance of element $i$ before $j$
9	Абсолютная значимость элемента $i$ перед $j$ Absolute importance of element $i$ before $j$
2, 4, 6, 8	Компромиссы между немного отличающимися от основных чисел суждениями Trade-offs between judgments slightly different from the main numbers

Таблица 3. Величина случайной согласованности

Table 3. Random consistency table

Размер матрицы Matrix size	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Величина СС Value RC	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

ОС вычисляется по формуле (6):

$$ОС = \frac{ИС}{СС} \quad (6)$$

В нашем случае ОС составляет 0,08, что меньше 0,1 и означает, что мнение экспертов согласовано.

При исследовании по методу МАИ под согласованностью матрицы понимают, что «при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них» [1]. Это положение явно противоречит принципу экспертного мнения, где оценки даже одного эксперта математически могут быть не согласованы по параметрам матрицы. В принципе, трудно, а порой даже невозможно получить математически согласованное мнение, и это будет тем труднее, чем больше критериев оценки

и количество экспертов. В МАИ ОС четко обозначается показателем 0,1, но в некоторых работах встречаются рассуждения о приемлемости показателя 0,2 [7].

Для оценки эффективности или выбора основной характеристики РТК, определяющей его работоспособность, будет необходимо согласовывать экспертные предпочтения для получения приемлемого ОС, что отрицательно скажется на объективности оценки [9].

В нашем случае локальный вектор приоритетов лучшим был у критерия 1 «Стоимость» = 0,403, следующий показатель по величине – критерий 3 «Количество личного состава для развертывания и работы», он имеет значение 0,233. Оценки этих критериев математически

больше локальных векторов приоритетов критериев 4, 5, 6. Между тем именно они определяют смысл внедрения РТК. Это противоречие легко объясняется размером широты взгляда на проблему (крайне субъективного), с точки зрения массового применения РТК важны критерии 1 и 3, при взгляде на результаты опытной эксплуатации критерии 4, 5, 6. Очень важен учет конкретных условий, в которых оцениваются образцы. Для всех этих случаев необходимы свои матрицы приоритетов с разными экспертными оценками. Согласование экспертных оценок достаточно важно

в МАИ, существуют определенные методики, выявляющие критерии с наибольшей рассогласованностью как предмета исследования [10].

На следующем этапе исследования проводилось сравнение локальных векторов приоритетов  $Y_{nk}$  предлагаемых альтернатив по каждому критерию с вычислением ОС матрицы оценки критериев. Результаты вычислений, по представленной ранее методике, указаны в таблицах 4–9. Значение ОС в каждом случае не превышало 0,1

**Таблица 4.** Выявление приоритетов по критерию «Стоимость»  
**Table 4.** Identification of priorities according to the criterion "Cost"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,14	0,087
2	3,00	1,00	0,33	0,243
3	7,00	3,00	1,00	0,670
Итого: Total:	11,00	4,33	1,48	1,000

Значение ОС равно 0,006.

**Таблица 5.** Выявление приоритетов по критерию «Быстрота развертывания»  
**Table 5.** Identification of priorities according to the criterion "Quickness of deployment"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,14	1,00	0,119
2	7,00	1,00	5,00	0,747
3	1,00	0,20	1,00	0,134
Итого: Total:	9,00	1,34	7,00	1,000

Значение ОС равно 0,01.

**Таблица 6.** Выявление приоритетов по критерию «Количество личного состава»  
**Table 6.** Identification of priorities according to the criterion "Number of personnel"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,20	0,114
2	3,00	1,00	1,00	0,405
3	5,00	1,00	1,00	0,481
Итого: Total:	9,00	2,33	2,20	1,000

Значение ОС равно 0,025.



**Таблица 7.** Выявление приоритетов по критерию «Надежность»**Table 7.** Identification of priorities according to the criterion "Reliability"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,20	0,3(3)	0,114
2	5,00	1,00	1,00	0,480
3	3,00	1,00	1,00	0,406
Итого: Total:	9,00	2,20	2,33	1,000

Значение ОС равно 0,025.

**Таблица 8.** Выявление приоритетов по критерию «Время выполнения задачи»**Table 8.** Identification of priorities according to the criterion "Time to complete the task"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,33	0,140
2	3,00	1,00	0,50	0,332
3	3,00	2,00	1,00	0,528
Итого: Total:	7,00	3,33	1,83	1,000

Значение ОС равно 0,046.

**Таблица 9.** Выявление приоритетов по критерию «Безопасность»**Table 9.** Identification of priorities according to the criterion "Safety"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,25	0,25	0,109
2	4,00	1,00	2,00	0,547
3	4,00	0,5	1,00	0,344
Итого: Total:	9,00	1,75	3,25	1,000

Значение ОС равно 0,046.

Расчет приоритетов для всей иерархии в совокупности, согласно МАИ, осуществлялся на основе синтеза приоритетов. Так называемые глобальные приоритеты были рассчитаны по формуле (7):

$$Z_{nk} = \sum_{i=1}^n X_n Y_{nk} \quad (7)$$

Расчет глобальных приоритетов приведен в табл. 10.

**Таблица 10.** Результаты расчета глобальных приоритетов альтернатив  
**Table 10.** Results of calculating the global priorities of alternatives

Критерий Criterion	Локальный вектор приоритетов критериев $X_i$ Local vector of criteria priorities $X_i$	Образец Sample		
		1	2	3
1	0,403	0,087	0,243	0,670
2	0,144	0,119	0,747	0,134
3	0,232	0,114	0,405	0,481
4	0,070	0,114	0,480	0,406
5	0,067	0,140	0,332	0,528
6	0,081	0,109	0,547	0,344
Глобальный приоритет Global Priority		0,106	0,401	0,493

### Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о приоритете характеристик образца 3, то есть перспективного РТК с характеристиками, желаемо превосходящими другие образцы. Метод МАИ дает однозначный и обоснованный ответ преимущества альтернативы с большим глобальным приоритетом над остальными по определенным критериям. Собственно, поэтому метод широко распространен, и, как было сказано выше, имеет широкое применение в экономической и управленческих отраслях.

Недостаток метода, на который мы обращали внимание выше, в том, что он оценивает выбранные критерии не по объективным показателям, а по субъективному мнению экспертов.

Критерии, которыми они оперируют, безусловно, являются важными, но весь спектр применения РТК в практической деятельности отразить не могут. Учет всех этих факторов ведет к значительному усложнению расчетов и трудностям, а порой и невозможности получить требуемое ОС, что делает достижение цели исследования по МАИ невозможным.

В качестве окончательного вывода можно отметить, что для комплексной оценки характеристик проектируемого РТК необходимы другие методы математического анализа, основанные на статистике применения образцов РТК для решения практических задач с учетом условий применения. Тем не менее МАИ может быть полезен в тех случаях, когда для оценки достаточно мнения экспертов, оно носит очевидно объективный характер и согласовано.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ., науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М. : ЛКИ, 2008. 360 с.
2. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8–13.
3. Коробов В. Б., Тутьгин А. Г. Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения // Экономика и управление. 2016. № 8 (130). С. 60–65.
4. Митихин В. Г. Об одном контрпримере для метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 3. С. 77–79.

5. Картеничев А. Ю., Литвин П. М., Панфилова Е. В. Перспективный робототехнический комплекс для тушения пожаров в экстремальных условиях // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. Железнодорожск : ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 552–557.
6. Солод С. А. Метод анализа иерархий при выборе тактики управления пожарно-спасательными частями // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2019. № 4 (40). С. 21–25.
7. Ласута Г. Ф., Карпиленя Н. В., Булва А. Д. Методика ранжирования организаций в интересах гражданской обороны с использованием метода анализа иерархий // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2019. Т. 3. № 3. С. 301–313.
8. Манайчева, В. А., Хусниязов, М. Х. Применение метода анализа иерархий для определения центра технологического блока установок нефтепереработки // Нефтегазовое дело : сетевое издание. 2006. № 2. URL: <https://ogbus.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
9. Умников Е. В., Атакищев О. И., Грачев В. А. Применение метода анализа иерархий Саати для оценки эффективности системы защиты информации виртуального полигона // Известия института инженерной физики. 2022. № 1 (63). С. 99–103.
10. О повышении индекса согласованности матрицы парных сравнений в системах поддержки принятия решений / А. Е. Куренных и др. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 196. 16 с.

#### REFERENCES

1. Saaty, T. Decision making under dependencies and feedbacks: Analytical networks / T. Saaty; per. from English; scientific editor: A.V. Andreichikov, O.N. Andreichikov. M.: LKI, 2008; 360.
2. Podinovsky V. V., Podinovskaya O. V. On the incorrectness of the hierarchy analysis method. Problemy upravleniya. 2011; 1: 8–13. (rus).
3. Korobov V.B., Tutygin A.G. Problems of using the method of analysis of hierarchies and ways to solve them. Economics and Management. 2016; 8 (130): 60–65. (rus).
4. Mitikhin V. G. On a counterexample for the method of analysis of hierarchies. Control Problems. 2012; 3: 77–79. (rus).
5. Kartenichev A.Yu., Litvin P.M., Panfilova E.V. A promising robotic complex for extinguishing fires in extreme conditions // Topical issues of fire safety and emergency protection. Collection of articles based on materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. 2019. (rus).
6. Malt S.A. Method of analysis of hierarchies in the choice of management tactics for fire and rescue units. Emergency situations: industrial and environmental safety. 2019; 4 (40): 21–25.
7. Lasuta G.F., Karpilenya N.V., Bulva A.D. Methodology for ranking organizations in the interests of civil defense using the method of analysis of hierarchies. Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. 2019; 3. (rus).
8. Manaycheva V.A., Khusniyarov M.Kh. Application of the method of analysis of hierarchies to determine the center of the technological unit of oil refining units. Oil and Gas Business. 2006. <http://www.ogbas.ru>. (rus).
9. Umnikov E.V., Atakischev O.I., Grachev V.A. Application of the Saaty Hierarchy Analysis Method to Evaluate the Effectiveness of the Virtual Polygon Information Security System. Izvestiya of the Institute of Engineering Physics. 2022; 1 (63). (rus).
10. Kurennykh A.E. On increasing the index of consistency of the matrix of paired comparisons in decision support systems. Preprints of the IAM im. M.V. Keldysh. 2018; 196: 16.

#### Информация об авторах

**Логинов Валерий Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 1103066; e-mail: [bazalt@mail.ru](mailto:bazalt@mail.ru)

#### Information about the authors

**Valery V. Loginov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate Professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 1103066; e-mail: [bazalt@mail.ru](mailto:bazalt@mail.ru)

**Вишняков Александр Валерьевич**, кандидат биологических наук, доцент, профессор, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 848624;  
e-mail: [alexvish63@mail.ru](mailto:alexvish63@mail.ru)

**Зубарев Игорь Александрович**, кандидат педагогических наук, доцент, начальник УНК, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 836075;  
e-mail: [zubarev@mail.ru](mailto:zubarev@mail.ru)

**Alexander V. Vishnyakov**, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 848624;  
e-mail: [alexvish63@mail.ru](mailto:alexvish63@mail.ru)

**Igor A. Zubarev**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the UNC, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 836075;  
e-mail: [zubarev@mail.ru](mailto:zubarev@mail.ru)

**БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ / SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS**

УДК 614.841.42

**АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО СПОСОБАМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД С 2014 ПО 2022 ГОДЫ****Кректунув Алексей Александрович<sup>1</sup>, Ефимов Иван Александрович<sup>1</sup>,  
Васьков Яков Николаевич<sup>1</sup>, Залесов Сергей Вениаминович<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия**АННОТАЦИЯ**

В работе представлена аналитическая информация по обнаружению лесных пожаров на различных площадях в таком регионе Российской Федерации, как Свердловская область. В Свердловской области большое количество населенных пунктов подвержено угрозе лесных пожаров. Именно своевременное обнаружение возгорания в лесу позволяет имеющимся силам и средствам по борьбе с лесными пожарами эффективно организовать его тушение и подготовить населенные пункты, находящиеся вблизи очага возгорания, к возможному переходу на них огня лесного пожара. В настоящее время системы обнаружения лесных пожаров и качество этих систем активно развиваются, внедряются в деятельность работников лесопожарных формирований и совершенствуются, но, несмотря на это, площади, которые успевают охватить лесные пожары до момента их обнаружения, по-прежнему остаются большими. Здесь становятся актуальными вопросы об эффективности применения различных способов обнаружения лесных пожаров в привязке к площади обнаружения, о результативности мероприятий по совершенствованию указанного направления деятельности, а также о целесообразности использования некоторых способов обнаружения лесных пожаров.

**Ключевые слова:** лесной пожар, обнаружение, дистанционное наблюдение, чрезвычайная ситуация, лесная авиация, лесной пожар, защита населенных пунктов от лесных пожаров

**ANALYSIS OF DATA ON METHODS OF FOREST FIRE DETECTION  
IN THE SVERDLOVSK REGION FOR THE PERIOD FROM 2014 TO 2022****Alexey A. Krektunov<sup>1</sup>, Ivan A. Efimov<sup>1</sup>, Yakov N. Vaskov<sup>1</sup>, Sergey V. Zalesov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation<sup>2</sup> Ural State Forestry University, Ekaterinburg, Russian Federation**ABSTRACT**

The paper presents analytical information on the detection of forest fires in various areas in such a region of the Russian Federation as the Sverdlovsk region. In the Sverdlovsk region, a large number of settlements are settlements that, in accordance with the Rules of the fire regime in the Russian Federation, are subject to the threat of forest fires. It is the timely detection of a fire in the forest that allows the available forces and means to combat forest fires to effectively organize its extinguishing and prepare settlements located near the source of fire for a possible transition to forest fires. Currently, forest fire detection systems and the quality of these systems are actively developing, being introduced into the activities of forest fire workers and being improved, but despite this, the areas that forest fires manage to cover before they are detected still remain large. Here the question of the effectiveness of the application of various methods for detecting forest fires in relation to the area of detection of forest fires, the effectiveness of measures to improve this area of activity, as well as the feasibility of using some methods of detecting forest fires becomes relevant.

**Keywords:** forest fire, detection, remote monitoring, emergency, forest aviation, forest fire, protection of settlements from forest fires

В соответствии с законодательством Российской Федерации, чрезвычайные ситуации в лесах классифицируются и подразделяются на [1]:

чрезвычайные ситуации в лесах муниципального характера;

чрезвычайные ситуации в лесах регионального характера;

чрезвычайные ситуации в лесах межрегионального характера;

чрезвычайные ситуации в лесах федерального характера.

Приведенная классификация устанавливается исходя из территориального нахождения лесного пожара, его площади, расположения лесного пожара вблизи населенных пунктов или объектов инфраструктуры, а также привлечения на его тушение определенной доли сил и средств лесопожарных формирований от общего их количества, предусмотренного сводным планом тушения лесных пожаров. Другими словами, чем крупнее лесной пожар, тем масштабнее классификация его характера и тем больше требуется ресурсов для борьбы с ним. В этой связи очевиден тот факт, что чем раньше будет обнаружен лесной пожар, тем меньше вероятность его перерастания в более серьезную чрезвычайную ситуацию.

Изучение закономерностей и особенностей процесса обнаружения лесных пожаров – действие чрезвычайно важное и необходимое. С одной стороны, оно позволяет выявить наиболее эффективные способы их обнаружения, а с другой – предложить меры как организационного, так и капитального характера, позволяющие усовершенствовать указанный процесс. Кроме того, минимально возможное время до обнаружения лесных пожаров на минимальной площади позволяет максимально обезопасить населенные пункты и объекты инфраструктуры от возможного перехода на них огня лесных пожаров путем увеличения времени на принятие необходимых мер.

В свете ежегодных последствий от перехода природных пожаров на территорию населенных пунктов рассматриваемое направление исследований становится особенно актуальным. Так, в конце апреля – начале мая 2022 года на территории Красноярского края России отмечены

случаи природных пожаров, которые распространились на территорию населенных пунктов и нанесли значительный материальный ущерб. Наиболее серьезный ущерб указанные пожары нанесли в следующих населенных пунктах Красноярского края: г. Уяр (Уярский район), деревня Павловка (Боготольский район), Ашпатск (Дзержинский район), Талажанка (Казачинский район) [2–5].

Леса на территории Свердловской области занимают 82,5 % от общей площади субъекта [6], что говорит о важности эффективной и результативной борьбы с природными пожарами, возникающими на ее территории, в том числе опираясь на данные по их обнаружению.

Нами обобщена информация по количеству лесных пожаров на территории Свердловской области за период с 2014 по 2022 годы, обобщенные данные представлены в таблице 1. Отметим, что в отдельные годы рассматриваемого периода, в основном исходя из погодных условий, количество лесных пожаров на территории Свердловской области может отличаться в несколько раз, но при этом остается на уровне, требующем серьезных усилий для того, чтобы обезопасить население, проживающее на территории субъекта.

Наглядно информация из табл. 1 представлена на рис. 1.

**Таблица 1.** Количество лесных пожаров, возникших в лесах Свердловской области с 2014 по 2022 гг.

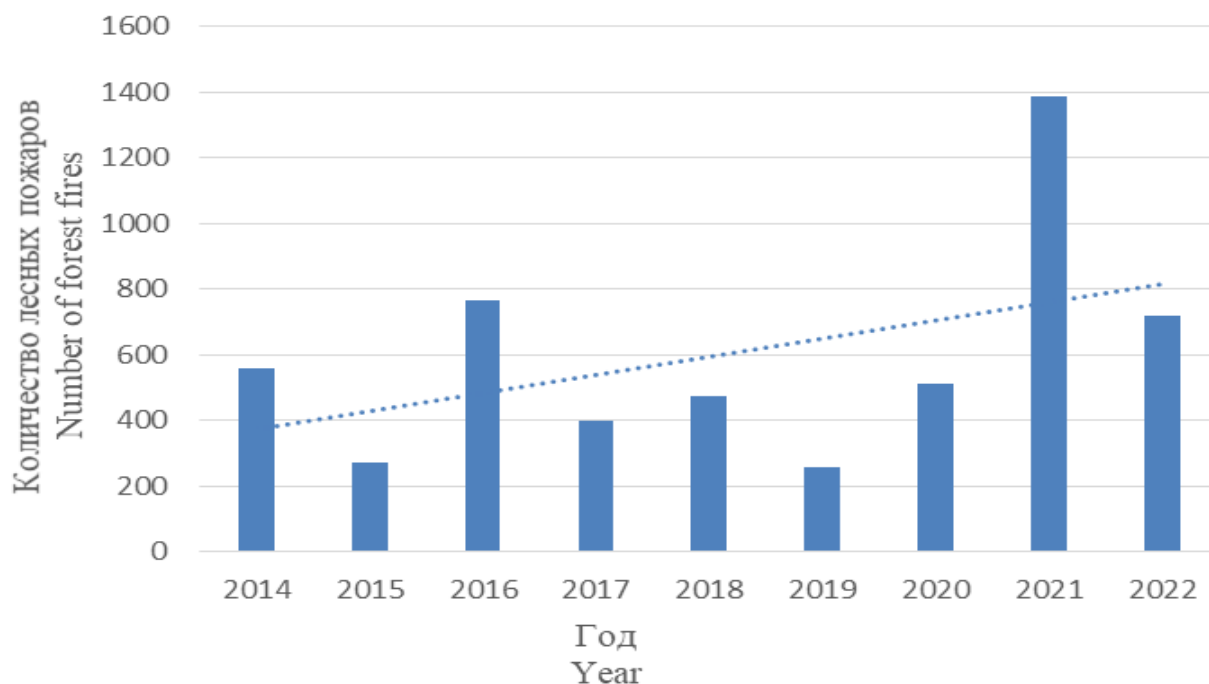
**Table 1.**

The number of forest fires that occurred in the forests of the Sverdlovsk region from 2014 to 2022

Год Year	Количество лесных пожаров Number of forest fires
2014	557
2015	274
2016	767
2017	397
2018	475
2019	258
2020	513
2021	1386
2022	717

Таким образом, за период исследования на территории области произошло 5343 лесных пожара, среднее ежегодное значение составляет 594 пожара. Количество лесных пожаров на территории Свердловской области превышало их среднее значение в 2016, 2021 и 2022 годах.

Современный подход к раннему обнаружению лесных пожаров предполагает использование различных способов: видеонаблюдения, позволяющих заметить дым и вывести место возникновения возгорания на электронную карту [7]; осуществление лесоавиационных работ в рамках единой системы авиационной охраны земель лесного фонда [8] и другие.



**Рис. 1.** Кол-во пожаров, возникших в лесах Свердловской области с 2014 по 2022 гг.

**Fig. 1.** The number of forest fires that occurred in the forests of the Sverdlovsk region from 2014 to 2022

Лесные пожары на территории области обнаруживаются различными способами: с использованием технических средств, работниками лесопожарных формирований, непосредственно контролирующими ситуацию с лесными пожарами; населением, проживающим на территории субъекта; лесопользователями

и т. п. [9]. В качестве наглядного примера приведем обобщенную табличную информацию по способам обнаружения и площади обнаружения лесных пожаров на территории Свердловской области в 2022 году (табл. 2).

**Таблица 2.** Способы обнаружения и площади обнаружения лесных пожаров на территории Свердловской области в 2022 году

**Table 2.**

Detection methods and areas for detecting forest fires in the Sverdlovsk region in 2022

Способ обнаружения Detection method	Количество пожаров по площади обнаружения, га Number of fires by detection area, hectare						
	До 1 Up to 1	1–5	5–10	10–25	25–50	Более 50 Over 50	Всего Total
Наблюдение с пожарных наблюдательных пунктов Observation from fire observation posts	3	0	0	0	0	0	3



Наземное патрулирование лесов Ground patrol of forests	62	25	10	3	0	1	101
Лесоавиационные работы Forest aviation works	83	54	6	7	2	2	154
Лесопользователи Forest users	1	1	0	0	0	0	2
По информации от местного населения According to information from the local population	159	109	39	21	2	1	329
По данным космических средств According to spacecraft	2	13	6	6	1	1	29
Беспилотные летательные аппараты Unmanned aerial vehicles	1	0	0	1	0	0	2
Видеомониторинг Video monitoring	44	30	15	5	1	0	95
Всего Total	<b>357</b>	<b>232</b>	<b>76</b>	<b>43</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>717</b>

Более укрупненную и обобщенную информацию по способам обнаружения лесных пожаров на территории Свердловской области с 2014 по 2022 годы представим в таблице 3. Информации получена

путем сложения количества лесных пожаров по каждому способу обнаружения в каждый год периода исследования.

**Таблица 3.** Распределение лесных пожаров по количеству и способам их обнаружения на территории Свердловской области за период с 2014 по 2022 г.

**Table 3.**

Distribution of forest fires by number and methods of their detection in the Sverdlovsk region for the period from 2014 to 2022

Способ обнаружения Detection method	Количество лесных пожаров Number of forest fires	Доля обнаруженных пожаров, % Percentage of detected fires, %
Наблюдение с пожарных наблюдательных пунктов Observation from fire observation posts	124	2,7
Наземное патрулирование лесов Ground patrol of forests	1146	21,0
Лесоавиационные работы Forest aviation works	928	16,8
Лесопользователи	20	0,4

Forest users		
По информации от местного населения According to information from the local population	2379	45,0
По данным космических средств According to spacecraft	258	5,0
Беспилотные летательные аппараты Unmanned aerial vehicles	10	0,1
Видеомониторинг Video monitoring	478	9,0
Всего Total	5343	100,0

Как отмечалось выше, именно обнаружение лесных пожаров на минимальной площади обеспечивает максимальную возможность его успешного тушения и недопущения распространения на населенные пункты и объекты инфра-

структуры. Поэтому, используя информацию из таблицы 2, проанализируем эффективность различных способов их обнаружения на площадях до 1 гектара и от 1 до 5 гектаров. Обобщенную информацию представим в табл. 4.

**Таблица 4.** Распределение лесных пожаров площадью до 1 га и от 1 до 5 гектаров по количеству и способам их обнаружения на территории Свердловской области в 2022 г.

**Table 4.**

Distribution of forest fires with an area of up to 1 ha and from 1 to 5 hectares by the number and methods of their detection in the Sverdlovsk region in 2022

Способ обнаружения Detection method	До 1 гектара Up to 1 hectare		1–5 гектаров 1–5 hectares	
	Количество лесных пожаров Number of forest fires	Доля обнаруженных пожаров, % Percentage of detected fires, %	Количество лесных пожаров Number of forest fires	Доля обнаруженных пожаров, % Percentage of detected fires, %
Наблюдение с пожарных наблюдательных пунктов Observation from fire observation posts	3	0,8	0	0
Наземное патрулирование лесов Ground patrol of forests	62	17,5	25	10,8
Лесоавиационные	83	23,4	54	23,3

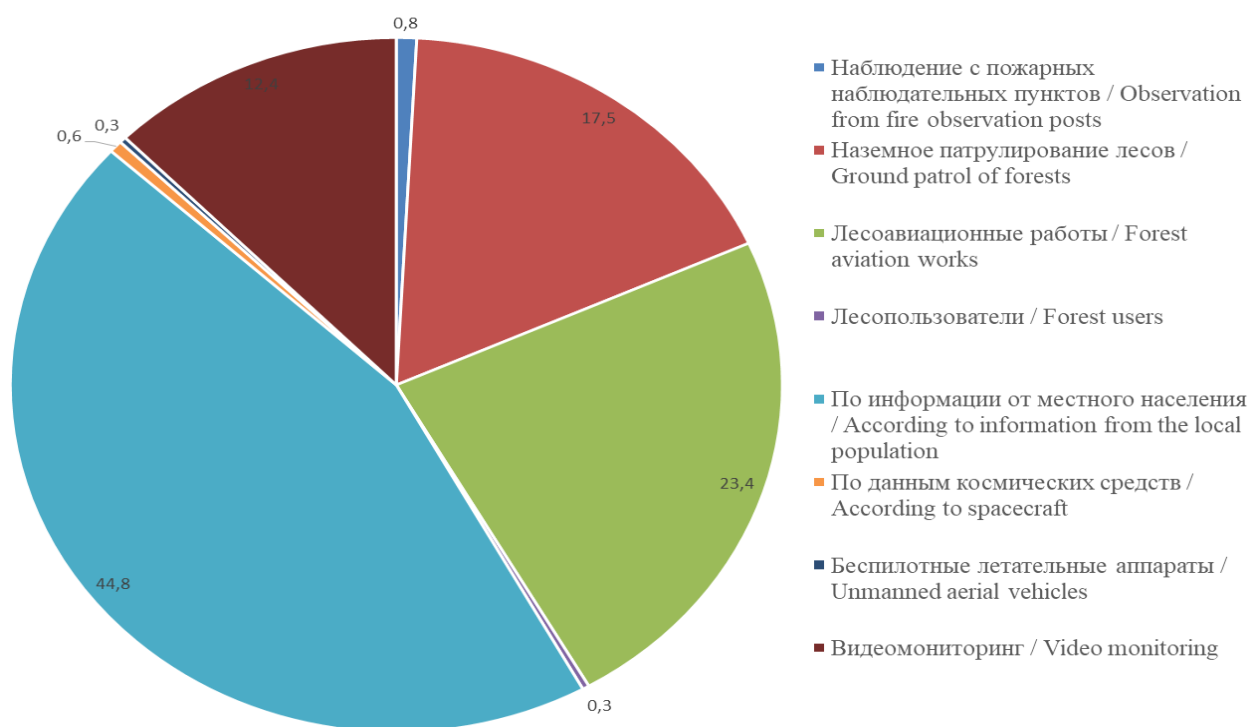
работы Forest aviation works				
Лесопользователи Forest users	1	0,3	1	0,4
По информации от местного населения According to information from the local population	159	44,8	109	47,0
По данным космических средств According to spacecraft	2	0,6	13	5,6
Беспилотные летательные аппараты Unmanned aerial vehicles	1	0,3	0	0
Видеомониторинг Video monitoring	44	12,4	30	12,9

Полученные расчетным путем данные по процентному соотношению количества обнаруженных лесных пожаров на территории Свердловской области в 2022 году представлены на рис. 2 (площадь обнаружения до 1 гектара) и 3 (площадь обнаружения от 1 до 5 гектаров).

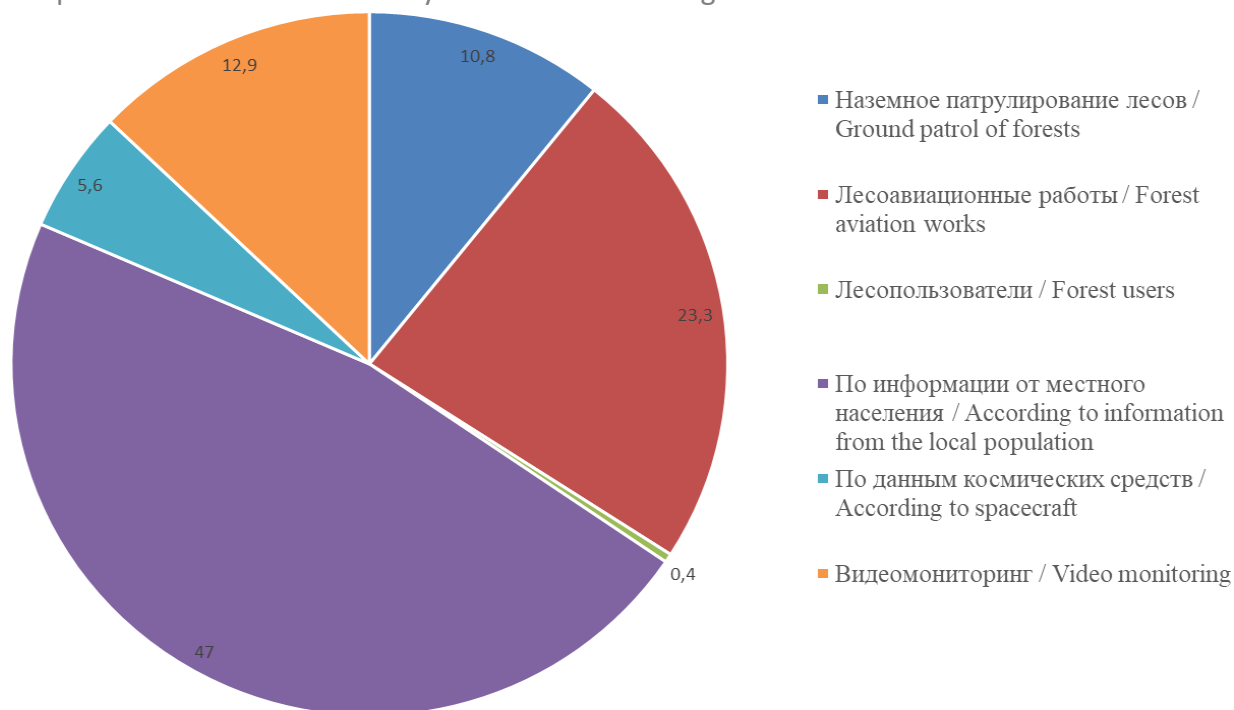
Опираясь на полученные данные по процентному соотношению обнаруженных лесных пожаров площадью до 1 га и от 1 до 5 гектаров по способам их обнаружения на территории Свердловской области в 2022 году, можно сделать следующие выводы.

1. Одним из главных факторов, влияющих на увеличение площади выгоревшего леса, является время, в течение которого развивается лесной пожар. В этой связи минимизации причиненного ущерба будет способствовать наиболее раннее время начала тушения возникшего горения.

2. Не зависимо от площади обнаружения лесных пожаров, местное население является основным источником сообщения об их возникновении, что говорит о возникновении лесных пожаров в относительной близости от населенных пунктов и мест нахождения людей.



**Рис. 2.** Распределение процентного соотношения количества обнаруженных лесных пожаров на площади до 1 гектара на территории Свердловской области в 2022 г.  
**Fig. 2.** Distribution of the percentage of detected forest fires on an area of up to 1 hectare in the territory of the Sverdlovsk region in 2022



**Рис. 3.** Распределение процентного соотношения количества обнаруженных лесных пожаров на площади от 1 до 5 гектаров на территории Свердловской области в 2022 г.  
**Fig. 3.** Distribution of the percentage of the number of detected forest fires on an area from 1 to 5 hectares in the Sverdlovsk region in 2022

3. С помощью наземного патрулирования лесов удалось выявить на 60 % больше лесных пожаров на минимальной площади (до 1 гектара), что говорит о целесообразности осуществления данного рода деятельности, особенно в весенне-летний пожароопасный период.

4. По данным космических средств большее количество пожаров было выявлено на площади от 1 до 5 гектаров, что говорит о сложности выявления лесных пожаров на самом начальном этапе горения.

5. Лесоавиационные работы позволили выявлять около четверти всех возникших лесных пожаров как на площади до 1 гектара, так и на площади от 1 до 5 гектаров. Указанный способ является наиболее эффективным для их обнаружения в труднодоступных и удаленных лесах, но является одним из самых затратных.

6. При всей своей эффективности в ряде случаев лесные пожары почти не обнаруживаются, с помощью беспилотных летательных аппаратов, что говорит о несистемном их внедрении в деятельность работников лесного хозяйства.

Представленные выводы подтверждаются ранее проведенной работой по изучению способов обнаружения лесных пожаров на территории Свердловской области на разных площадях [10, 11] и говорят о перспективности изучения этого вопроса в т.ч. в целях охраны населенных пунктов от лесных пожаров.

Подводя итог отметим, что внедрение современных технических средств по обнаружению лесных пожаров позволит уменьшить время с момента их возникновения до момента их обнаружения и, таким образом, снизить последствия от них.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О чрезвычайных ситуациях в лесах, возникших вследствие лесных пожаров : постановление Правительства РФ от 17.05.2011 № 376 // Государственная система правовой информации : офиц. интернет-портал. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
2. Зиновьев, Е. Если бы сразу потушили поле, огонь бы не пошел на дома»: репортаж из Уяра, где сгорел 201 дом // NGS24.RU : сетевое издание. URL: <https://ngs24.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
3. Саенко, С. Сгоревшую деревню Павловка в Боготольском районе восстанавливают после пожара // БезФормата : сетевое издание. URL: <https://krasnoyarsk.bezformata.com> (дата обращения: 09.06.2023).
4. Шабуров, Д. Выгоревшую дотла деревню Ашпатск начали восстанавливать // Енисей : офиц. сайт телеканала. URL: <https://www.enisey.tv> (дата обращения: 09.06.2023).
5. Локализация пожара в Казачинском районе с. Талажанка 07.05.2022 г. // МЧС России. Главное управление по Красноярскому краю : офиц. сайт. URL: <https://24.mchs.gov.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
6. Об утверждении Сводного плана тушения лесных пожаров на территории Свердловской области на период пожароопасного сезона 2023 года: указ губернатора Свердловской области № 114-УГ от 14.03.2023 // Государственная система правовой информации : офиц. интернет-портал. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6600202303200001?index=2&rangeSize=1> (дата обращения: 09.06.2023).
7. Шепелева И. С. Видеомониторинг – один из способов обнаружения лесных пожаров // Охрана и защита лесов. 2015. № 4. С. 46–50.
8. Акбердин В. В. Современное состояние и перспективы деятельности центральной базы авиационной охраны лесов — «Авиалесоохрана» // Лесохозяйственная информация. 2018. № 3. С. 12–19.
9. Распределение пожаров по способам обнаружения и площади обнаружения на территории Свердловской области (2014–2022 гг.) : материалы Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области. Документ опубликован не был.
10. Анализ данных обнаружения лесных пожаров на территории Свердловской области / А. А. Кректунов и др. // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 142–149.

11. Охрана населенных пунктов Свердловской области от лесных пожаров на основе анализа способов их обнаружения / А. А. Кректунов и др. // Техносферная безопасность. 2022. № 2 (35). С. 3–8.

#### REFERENCES

1. On emergency situations in forests resulting from forest fires: Decree of the Government of the Russian Federation Rossiyskaya Gazeta. May 17, 2011; 110: 376. (rus).
2. If the field had been extinguished immediately, the fire would not have gone to the houses”: a report from Uyar, where 201 houses burned down [Electronic resource]. <https://ngs24.ru/text/incidents/2022/05/08/71316452>. (rus).
3. The burnt village of Pavlovka in the Bogotolsky district is being restored after a fire [Electronic resource]. <https://krasnoyarsk.bezformata.com/listnews/derevnyu-pavlovka-v-bogotolskom/105485154/> (date of access - 03/26/2023). (rus).
4. The burned-out village of Ashpatsk began to be restored [Electronic resource]. <https://www.enisey.tv/news/post-42871/>(date of access - 03/26/2023). (rus).
5. Localization of the fire in the Kazachinsky district with. Talazhanka 05/07/2022 [Electronic resource]. <https://24.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/4740596> (date of access - 03/26/2023). (rus).
6. On the approval of the Consolidated plan for extinguishing forest fires on the territory of the Sverdlovsk region for the period of the fire season of 2023: decree of the governor of the Sverdlovsk region No. 114-UG dated March 14, 2023 [Electronic resource]. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6600202303200001?index=2&rangeSize=1> (rus).
7. Shepeleva I.S. Video monitoring is one of the ways to detect forest fires. Protection and protection of forests. 2015; 4: 46–50. (rus).
8. Akberdin V.V. The current state and prospects for the activities of the central base of aviation forest protection – «Avialesookhrana». Forestry information. 2018; 3: 12–19. (rus).
9. Distribution of fires by detection methods and area of detection on the territory of the Sverdlovsk region (2014–2022). Materials of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Sverdlovsk Region. (rus).
10. Krekturnov A.A., Kornilov A.A., Zalesov S.V., Tokarev D.S. Analysis of forest fire detection data on the territory of the Sverdlovsk region. Technospheric safety. 2020; 3 (28): 142–149. (rus).
11. Krekturnov A. A., Efimov I. A., Zalesov S.V., Sekerin I.M. Protection of settlements in the Sverdlovsk region from forest fires based on the analysis of methods for their detection. Technospheric safety. 2022; 2 (35): 3–8. (rus).

#### Информация об авторах

**Кректунов Алексей Александрович**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры надзорной деятельности и права, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; ORCID 0000-0003-2160-3305; e-mail: [alexkrec96@mail.ru](mailto:alexkrec96@mail.ru)

**Ефимов Иван Александрович**, кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры надзорной деятельности и права, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; AuthorID 799824; e-mail: [e3efimov@yandex.ru](mailto:e3efimov@yandex.ru)

#### Information about the authors

**Alexey A. Krekturnov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Supervisory Activities and Law, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ORCID 0000-0003-2160-3305; e-mail: [alexkrec96@mail.ru](mailto:alexkrec96@mail.ru)

**Ivan A. Efimov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Supervisory Activities and Law, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; AuthorID 799824; e-mail: [e3efimov@yandex.ru](mailto:e3efimov@yandex.ru)

**Васьков Яков Николаевич**, магистрант, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; ORCID 0000-0003-4757-8005; e-mail: [vaskov\\_y\\_66@mail.ru](mailto:vaskov_y_66@mail.ru)

**Yakov N. Vaskov**, graduate student, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ORCID 0000-0003-4757-8005; e-mail: [vaskov\\_y\\_66@mail.ru](mailto:vaskov_y_66@mail.ru)

**Залесов Сергей Вениаминович**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37; ORCID 0000-0003-3779-410X; e-mail: [zalesov@usfeu.ru](mailto:zalesov@usfeu.ru)

**Sergey V. Zalesov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, Siberian tract St., 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation; ORCID 0000-0003-3779-410X; e-mail: [zalesov@usfeu.ru](mailto:zalesov@usfeu.ru)

УДК 614.8

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАВОДКООПАСНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД С 2013 ПО 2023 ГОД

Королев Денис Сергеевич<sup>1</sup>, Вытовтов Алексей Владимирович<sup>1,2</sup>,  
Рябущенко Алексей Сергеевич<sup>3</sup>, Русских Дмитрий Викторович<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>ООО ПНР «Система – Сервис», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Академия Государственной противопожарной службы, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

В статье поднимается актуальный вопрос необходимости обеспечения защиты людей, имущества и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Авторами отмечается, что не менее опасным природным катаклизмом на планете, наряду с природными пожарами, землетрясениями и т. д., является весеннее половодье, способствующее быстрому затоплению и подтоплению зданий, сооружений, строений, промышленных коммуникаций, приусадебных участков, а в некоторых случаях вызывающее смерть людей. Кроме того, оказывается существенное влияние на нарастание социально-экономической напряженности, что обусловлено бессилием человека перед природными катастрофами. Однако, рассмотрев основные причины возникновения затоплений (подтоплений), отмечается непосредственное участие человека, например, в случаях застройки поймы реки и т. д. Поэтому в работе определяется цель – проведение расширенного статистического анализа паводкоопасной обстановки на территории Воронежской области для аналитической оценки степени опасности. По результатам проведенной работы было установлено, что складывающаяся обстановка на территории области остается в пределах допустимых рисков. Наряду с этим были построены и рассчитаны аппроксимирующие функции для некоторых показателей, которые в дальнейшем были использованы для прогнозирования обстановки в 2024 г. Достоверность полученных данных находится в пределах от 63 до 83 %, при этом коэффициент корреляции характеризует тесноту полученных связей, что является хорошим показателем.

**Ключевые слова:** безопасность, прогнозирование, угроза жизни, анализ, статистические данные

### ANALYSIS OF INDICATORS OF THE FLOOD HAZARD SITUATION IN THE TERRITORY OF THE VORONEZH REGION FOR THE PERIOD FROM 2013 TO 2023

Denis S. Korolev<sup>1</sup>, Alexey V. Vytovtov<sup>1,2</sup>, Alexey S. Ryabuschenko<sup>3</sup>, Dmitry V. Russkikh<sup>4</sup>



<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh Institute for Advanced Training of Employees of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Voronezh, Russian Federation

<sup>3</sup>LLC PNR «System – Service», St. Petersburg, Russian Federation

<sup>4</sup>Academy of the State Fire Service, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

The article raises the urgent issue of the need to ensure the protection of people, property and territories from natural and man-made emergencies. The author notes that no less dangerous natural cataclysm on the planet, along with wildfires, earthquakes, etc., is the spring flood, which contributes to the rapid flooding and flooding of buildings, structures, buildings, industrial communications, homesteads, and in some cases cause the death of people. In addition, there is a significant impact on the increase in socio-economic tension, which is due to human impotence in the face of natural disasters. However, having considered the main causes of flooding (flooding), direct human involvement is noted, for example, in cases of floodplain development, etc. Therefore, the purpose of the work is to conduct an extended statistical analysis of the flood-prone situation on the territory of the Voronezh region, for an analytical assessment of the degree of danger. According to the results of the work carried out, it was found that the current situation in the region remains within acceptable risks. Along with this, approximating functions were constructed and calculated for some indicators, which were later used to predict the situation for the period 2024. The reliability of the data obtained is in the range from 63 to 83%, while the correlation coefficient characterizes the closeness of the obtained connections, which is a good indicator.

**Keywords:** security, forecasting, threat to life, analysis, statistical data

## Введение

В основе концепции обеспечения национальной безопасности Российской Федерации заложен принцип решения наиболее значимых приоритетных задач, направленных на обеспечение государственной и общественной безопасности [1]:

– проведение оперативного мониторинга и разработка превентивных мероприятий, направленных на предупреждение и развитие чрезвычайных ситуаций различного характера;

– минимизация размера ущерба и экономических потерь от чрезвычайной ситуации;

– оперативная ликвидация деструктивных ситуаций.

Успешное выполнение которых позволяет достичь основную цель – защитить население и территорию страны от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [2].

Стоит отметить, что одним из катастрофических по масштабу и экономическому ущербу природных катаклизмов, наряду с природными пожарами, является воздействие паводков и половодий на социальную инфраструктуру и населенные пункты, основными причинами которых являются [3, 4]:

– образование заторов льда (способствует резкому повышению уровня воды в реке, при котором она выходит из берегов и затопляет прилегающую местность);

— зарастание рек прибрежно-водной растительностью (уменьшается скорость течения воды, при котором повышается ее уровень с последующим подтоплением местности);

— застройка поймы реки (ограничивают естественный разлив воды);

— глубокое промерзание почвы в совокупности с обильными осадками и активным снеготаянием (способствует локальным затоплениям водами поверхностного стока пониженных участков местности);

— аварии на гидротехнических сооружениях (возможно переполнение водоема, что повлечет разрушение технологической конструкции с образованием волны прорыва).

В связи с этим проблема обеспечения безопасности при паводках и половодьях приобретает особую актуальность, особенно в условиях стремительного социально-экономического развития России.

## Методы и результаты исследований

Влияние социальных и экономических изменений на развитие научного потенциала страны позволили усовершенствовать статистический анализ и возможную оценку последствий от паводков и половодья. Поэтому основной целью работы является проведение расширенного статистического анализа паводкоопасной обстановки за период с 2013–2023гг. Объектом исследования выбрана Воронежская область, а предметом исследования выступит аналитическая оценка, отражающая степень опасности.

В соответствии со статистическими данными МЧС России была сформирована табл. 1, содержащая показатели паводкоопасной обстановки на территории области, ее последствия, являющиеся основополагающими в аналитическом учете [5–7].

**Таблица 1.** Количество случаев половодья (затоплений) и их последствия на территории Воронежской области

**Table 1.**

The number of cases of high water (flooding) and their consequences in the territory of the Voronezh region

Показатель Index	Рассматриваемый период (2013-2023) гг. The period under review is 2013 - 2023										
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Количество затоплений, ед Number of floods, units	24	3	5	7	9	107	5	2	8	3	33
Количество погибших, ед Number of dead, units	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Количество затопленных участков, ед Number of flooded areas, units	1704	3	7	15	2	5988	3	2	13	1	65
Количество затопленных мостов, ед Number of flooded bridges, units	18	0	1	2	3	45	0	2	4	2	31

Количество затопленных участков дорог, ед Number of flooded road sections, units	1	0	1	0	0	25	18	2	1	0	0
Количество затопленных зданий, ед Number of flooded buildings, units	72	0	0	0	4	498	0	0	0	0	0
Экономический ущерб, млн руб. Economic damage, million rubles	5,475	0,010	0,035	0,100	2,343	27,250	0,150	1,000	1,500	0,100	1,200

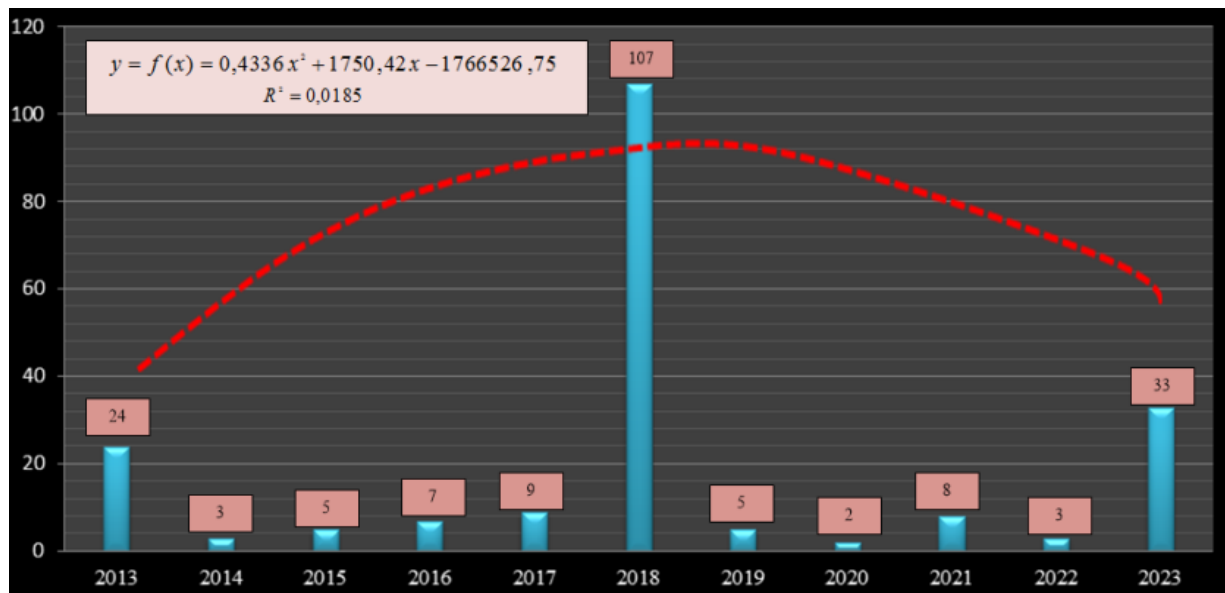
Изучение сведений, представленных в табл. 1, позволило установить, что наибольшее число негативных последствий было зарегистрировано в период весеннего половодья 2017–2018 гг.: число погибших составило 2 человека, а максимальный материальный ущерб превысил 27 миллионов рублей. При этом 2013–2016 гг. и 2019–2023 гг. отмечаются отсутствием несчастных случаев и незначительным ущербом в сравнении с 2018 г. Кроме того, аналитическая оценка показала, что самым массовым местом затоплений являлись объекты жилого сектора сельской местности (около 90 % случаев), включая низководные мосты и приусадебные участки. Таким образом, динамические показатели за 2013–2023 гг., убеждают нас в том, что половодье обладает существенным фактором риска, а вероятность серьезных социально-экономических последствий достаточно высокая.

Воспользуемся методом наименьших квадратов для построения аппроксимирующей функции распределения случайных величин (количество затоплений, количество затопленных приусадебных участков, материальный ущерб) по отчетным годам [8, 9]. Это позволит рассчитать сумму квадратов отклонений между эмпирическими и теоретическими значениями. Чем больше отклонение будет стремиться к минимуму, тем точнее должен быть прогноз.

Рассмотрим динамику зарегистрированных случаев затоплений (половодий) на территории Воронежской области. Здесь отчетливо прослеживается тенденция резкого увеличения количества деструктивных событий в период с 2013 по 2018 гг., а затем происходит постепенное снижение (рис. 1). В результате аппроксимации данных получены следующие коэффициенты:  $a_2 = 0,4336$ ;  $a_1 = 1750,42$ ;  $a_0 = 1766526,75$ , а уравнение примет вид (1):

$$y = f(x) = 0,4336x^2 + 1750,42x - 1766526,75, \quad (1)$$

$$R^2 = 0,0185$$



**Рис. 1.** Динамика подтоплений на территории Воронежской области

**Fig. 1.** Dynamics of flooding in the territory of the Voronezh region

Схожая ситуация прослеживается по количеству зарегистрированных случаев затопления (подтопления) приусадебных участков, т. е. с течением времени происходит увеличение, а затем спад деструктивных ситуаций. Однако существует некоторая особенность, обусловленная циклическостью периодов. Так, например, в 2013 г. зафиксировано 1704 единицы затопленных участков, затем в 2018 г. этот показатель достиг 5988, а в 2023 г. учтено

$$y = f(x) = -39,03x^2 + 157468,87x - 158809685,78, \tag{2}$$

$$R^2 = 0,05$$

Ранее отмечалось, что половодье характеризуется высокой угрозой для жизни людей, особенно для маломобильных групп населения, проживающих в сельской местности, но и несет в себе большой прямой ущерб. Опыт предыдущих лет (2013 г., 2018 г.) позволил своевременно разрабатывать и применять организационные и инженерно-технические

$$y = f(x) = -0,23x^2 + 951,49x - 959901,34, \tag{3}$$

$$R^2 = 0,07$$

65 случаев, что в сравнении с предыдущим периодом 2019–2022 гг. (суммарно 19 затопленных участков) является значимой величиной (рис. 2). В результате аппроксимации данных, получены следующие коэффициенты:  $a_2 = -39,03$ ;  $a_1 = 157468,87$ ;  $a_0 = 158809685,78$ , а уравнение примет вид (2):

мероприятия, снижающие риски потерь (рис. 3). В результате аппроксимации данных получены следующие коэффициенты:  $a_2 = -0,23$ ;  $a_1 = 951,49$ ;  $a_0 = 959901,34$ , а уравнение примет вид (3):

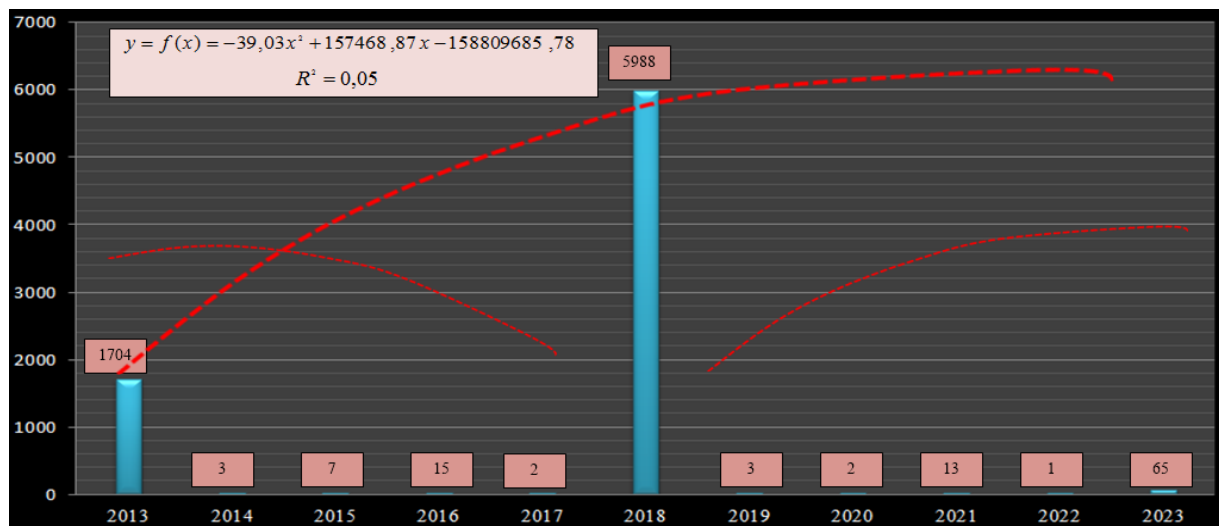


Рис. 2. Динамика затопленных приусадебных участков на территории Воронежской области

Fig.2. Dynamics of flooded household plots in the Voronezh region

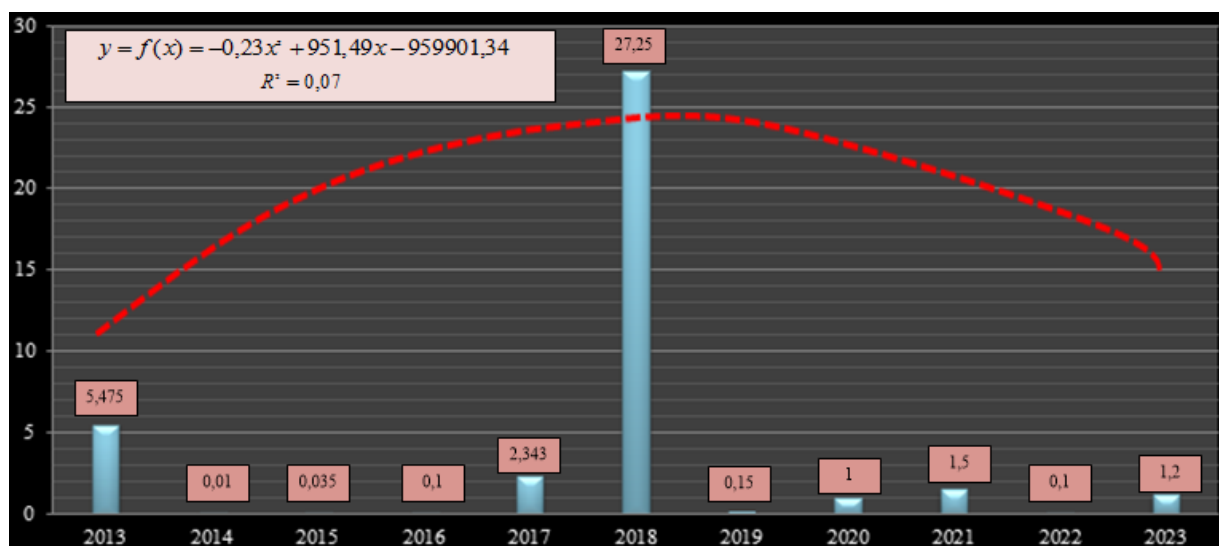


Рис. 3. Динамика прямого ущерба от затоплений (подтоплений)

Fig.3. Dynamics of direct damage from flooding (flooding)

В табл. 2 представлены рассчитанные функции аппроксимации и величины квадратов отклонений между эмпирическими и теоретическими значениями для выборки показателей. Установлено, что самый наименьший квадрат отклонения соответствует квадратичной регрессии,

следовательно, выбор в пользу квадратичной (4) является правильным:

$$y = f(x) = a_2x^2 + a_1x - a_0 \quad (4)$$

**Таблица 2.** Аппроксимирующие функции показателей половодья за период 2013–2023 гг.  
**Table 2.** Summary table of approximating functions of flood indicators for the period 2013–2023

Рассматриваемый показатель Considered indicator	Функция аппроксимации Approximation function	Величина отклонения Deviation amount
Количество затоплений за 2013–2023 гг. The number of floods (floods) for 2013–2023	$y = f(x) = 0.3636x - 715,09$	21674,2
	$y = f(x) = e^{3,8227-0,0008x}$	21431,1
	$y = f(x) = 0,4336x^2 + 1750,42x - 1766526,75$	21425,7
Количество затопленных участков за 2013–2023 гг. Number of flooded areas for 2013–2023	$y = f(x) = -74,63x - 151325,54$	75165100,0
	$y = f(x) = e^{415,48-0,2045x}$	74529768,0
	$y = f(x) = -39,03x^2 + 157468,87x - 158809685,78$	7436148,0
Экономический ущерб за 2013–2023 гг. Economic damage for 2013–2023	$y = f(x) = -0,1547x - 315,6715$	1408,0
	$y = f(x) = e^{-271,34+0,1341x}$	1394,0
	$y = f(x) = -0,23x^2 + 951,49x - 959901,34$	1392,0

Используя коэффициенты функций аппроксимации и исходные параметры, рассчитаем при помощи формулы (5) границы интервала, в котором будет сосредоточено более 95 % возможных прогнозируемых значений при неограниченно большом числе наблюдений для 2024 г. [10-12]:

$$\xi = t_{\text{крит}} \cdot S_y \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\vec{t} - t_p)^2}{\sum (t_i - \vec{t})^2}} \quad (5)$$

$t_p$  – период, для которого проводится прогнозирование (2024 г.);

$S_y$  – стандартная ошибка уравнения;

$t_{\text{крит}}$  – 2,752 (коэффициент Стьюдента) [13, 14, 15];

$n$  – количество исходных данных.

На этапе спецификации был выбран параболический тренд, а параметры прогнозирования определяли с помощью метода наименьших квадратов.

В результате прогноза были получены значения исходных показателей с максимальной достоверностью более 83 % (табл. 3), что является хорошим показателем и свидетельствует о том, что изменение временного периода не существенно влияет на исходные критерии.

При этом коэффициент корреляции (от 0,637 до 0,835) характеризует тесноту нелинейной связи и не влияет на направление, следовательно, полученные признаки должны быть сильными.

**Таблица 3.** Результаты прогнозирования  
**Table 3.** forecasting results

Показатель Index	Прогнозирование на 2024 г. Forecasting for 2024	Коэффициент детерминации, $R^2$ Determination coefficient, R2	Коэффициент корреляции, $r_{xy}$ Correlation coefficient, $r_{xy}$	Вероятность, (P), % Probability, P %
Количество затоплений (половодий), шт. Number of floods (floods), pcs.	17±11	0,0185	0,798	≥ 79
Количество затопленных участков, шт. Number of flooded areas, pcs.	173±39	0,0500	0,637	≥ 63
Прямой ущерб, млн руб. Direct damage, million rubles	1±0,5	0,0700	0,835	≥ 83

### Выводы

Проведенный расширенный статистический анализ паводкоопасной обстановки на территории Воронежской области за период 2013–2023 гг. показывает, что ситуация с последствиями весенних половодий остается стабильной и вполне прогнозируемой. Такое положение дел может быть объяснено достаточной и своевременной разработкой инженерно-техниче-

ских мероприятий, способствующих снижению рисков возникновения муниципальных и региональных чрезвычайных ситуаций. Кроме того, в работе построены аппроксимирующие функции основных показателей, наиболее характерных для выбранного природного катаклизма (количество затоплений, затопленные участки и т. д.). В результате получены границы исследований, определяющие наиболее проблемные места.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ от 02.07.2021 N 400 // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федер. закон Российской Федерации от 21.12.1994 N 68-ФЗ (послед. ред.) // КонсультантПлюс : сайт. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
3. Ромина Л. В. Наводнения в России. Причины и последствия // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 284–291.
4. Лисовицкий Н. В. Применение спутниковых данных при изучении причин наводнения // Студенческий вестник. 2021. № 19 (164). Часть 8. С. 64–66.
5. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М., 2003. 352 с.
6. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году : государственный доклад. // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
7. Официальная статистика. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Воронежской области (Воронежстат) : офиц. сайт. URL: <https://36.rosstat.gov.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
8. Голованчиков А. Б., Минь К. Д., Шибитова Н. В. Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов и методом наименьших относительных квадратов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 1 (26). С. 42–44.
9. Королев Д. С., Кончаков С. А. Оценка влияния цифровых технологий на пожарную безопасность нефтегазовых объектов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2022. № 1. С. 95–105.
10. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Kargashilov D.V., Odnolko A.A., Denisov M.S. Mathematical simulation of the forecasting process of the fire hazard properties of substances / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, – 2020. – 52025.
11. Gilbert, S.W. Estimating Smoke Alarm Effectiveness in Homes. Fire Technol 57, 1497–1516 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01072-z>.
12. Kountouris, Y. An Assessment of the Relationship Between Daylight Saving Time, Disruptions in Sleep Patterns and Dwelling Fires. Fire Technol 57, 123–144 (2021). – DOI 10.1007/s10694-020-00983-1.
13. Садовая И. И., Захарова О. А. Анализ достоверных различий агрохимических показателей при расчете коэффициента Стьюдента // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2022. Т. 14. № 3. С. 46–57.
14. Кадилова Ш. А., Жабборов Х. Ш., Элдор Эркин угли Ураков Оценка доверительного интервала и доверительной границы погрешности измерений // Приборы. 2019. № 3 (225). С. 44–46.
15. Tashenova L. V., Babkin A. V. Innovative activity of the enterprises in Kazakhstan: economic and statistical analysis // Bulletin of Karaganda University. Economy Series. 2020. Vol. 100. № 4. P. 142–154.

## REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation of July 2, 2021 No 400 “On the National Security Strategy of the Russian Federation”. Collection of Legislation of the Russian Federation. July 5, 2021; 27: 5351. (rus).
2. On the protection of the population and territories from natural and man-made emergencies. Federal Law of December 21, 1994 No 68. Collected Legislation of the Russian Federation. 199; 35: 3648. (rus).
3. Romina L.V. Floods in Russia. Causes and consequences. Life of the Earth. 2010; 32: 284–291. (rus).
4. Lisovitsky N.V. The use of satellite data in the study of the causes of flooding. Student Bulletin. 2021; 19-8 (164): 64–66. (rus).
5. Vorobyov Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Catastrophic floods at the beginning of the 21st century: lessons and conclusions. M: LLC «DEKS-PRESS», 2003; 352. (rus).
6. State report On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2021. M.: EMERCOM of Russia; FGBU VNII GOChS (FTs), 2022; 259. (rus).
7. Official statistics [Electronic resource] - Access mode <https://36.rosstat.gov.ru/ofstatistics>. (rus).



8. Golovanchikov A.B., Min K.D., Shibitova N.V. Approximation of experimental data by the least squares method and the least relative squares method. Energy and resource saving: industry and transport. 2019; 1 (26): 42–44. (rus).
9. Korolev D.S., Konchakov S.A. Assessing the impact of digital technologies on the fire safety of oil and gas facilities. Scientific and analytical journal «Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia». 2022; 1: 95–105. (rus).
10. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Kargashilov D.V., Odnolko A.A., Denisov M.S. Mathematical simulation of the forecasting process of the fire hazard properties of substances. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia. 2020; 52025. (rus).
11. Gilbert, S.W. Estimating Smoke Alarm Effectiveness in Homes. Fire Technol. 2021; 57: 1497–1516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01072-z>.
12. Kountouris, Y. An Assessment of the Relationship Between Daylight Saving Time, Disruptions in Sleep Patterns and Dwelling Fires. Fire Technol 57, 123–144 (2021). – DOI 10.1007/s10694-020-00983-1.
13. Sadovaya I.I., Zakharova O.A. Analysis of significant differences in agrochemical indicators when calculating the Student's coefficient. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University. P.A. Kostychev. 2022; 3: 46–57. (rus).
14. Kadirova Sh.A., Zhabborov Kh.Sh., Eldor Erkin ugli Urakov Estimation of the confidence interval and confidence limit of the measurement error. Instruments. 2019; 3 (225): 44–46. (rus).
15. Tashenova L.V., Babkin A.V. Innovative activity of the enterprises in kazakhstan: economic and statistical analysis. Bulletin of Karaganda University. Economy Series. 2020: 4: 142–154. (rus).

#### Информация об авторах

**Королев Денис Сергеевич**, доцент, кандидат технических наук, Воронежский государственный технический университет, Россия 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID 829407; e-mail: [otrid@rambler.ru](mailto:otrid@rambler.ru)

**Вытовтов Алексей Владимирович**, доцент, кандидат технических наук, Воронежский государственный технический университет, Россия 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID 754850; e-mail: [taft.rvk@yandex.ru](mailto:taft.rvk@yandex.ru)

**Рябущенко Алексей Сергеевич**, технический специалист ООО ПНР «Система – Сервис», Россия 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Арсенальная, д. 66, к. 3, оф. 603

**Русских Дмитрий Викторович**, заместитель начальника учебно-научного комплекса – начальник кафедры учебно-научного комплекса процессов горения и эко-

#### Information about the authors

**Denis S. Korolev**, associate Professor, Ph.D., Voronezh State Technical University, st. 20th anniversary of October, 84, Voronezh, 394006 Russian Federation; ID RISC 829407; e-mail: [otrid@rambler.ru](mailto:otrid@rambler.ru)

**Alexey V. Vytovtov**, associate Professor, Ph.D., Voronezh State Technical University, st. 20th anniversary of October, 84, Voronezh, 394006 Russian Federation; ID RISC 754850; e-mail: [taft.rvk@yandex.ru](mailto:taft.rvk@yandex.ru)

**Alexey S. Ryabuschenko**, technical specialist LLC PNR «System – Service», Russia 195009, St. Petersburg, st. Arsenalnaya, 66, building 3, 603

**Dmitry V. Russkikh**, Deputy Head of the Educational and Scientific Complex - Head of the Department (Combustion Processes and Environmental Safety) of the Educa-

логической безопасности, кандидат технических наук, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Россия 129366, г. Москва ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID 175685

tional and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, Ph.D., Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, st. Boris Galushkin, 4, Moscow, 129366 Russian Federation; ID RSCI 175685