

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Карпов А. В., Лучкин С. А., Гомозов А. В.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСТНИЧНЫХ КЛЕТОК.....3

Мокряк А. Ю., Сысоева Т. П., Мокряк А. В.

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ СУДОВОГО КАБЕЛЯ ПРИ СВЕРХТОКАХ.....23

Никишов Д. С., Хафизов И. Ф., Спыну Е. А., Колесник А. А.

ОЦЕНКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ И НЕАДИАБАТИЧНОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ37

Колесова В. Ю., Мельников Н. О., Монахов А. А., Головина Е. В.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕСЕЙ АНТИПИРЕНОВ ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ.....52

Беззапонная О. В., Глухих П. А., Елфимова М. В., Макаркин С. В.

ДИАГНОСТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА67

Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО ТУМАНА78

Григорьев Д. Ю., Плешаков В. В., Уваров И. А., Хохлова А. Ю.

ПРОБЛЕМЫ ОТСУТСТВИЯ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ЧАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ90

Фирсов А. Г., Загуменнова М. В., Чечетина Т. А.

КОНДИЦИОНЕРЫ: ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ РИСКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....108

Хафизов И. Ф., Султанов Р. М., Спыну Е. А., Галиахметов Э. А.

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПИРОФОРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ, НА ПИРОФОРНУЮ АКТИВНОСТЬ.....127

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Цветков Г. А., Коковин А. Н., Потураев П. С.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ КАСКАДОМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ.....136

Рыбаков А. В., Янышев П. А.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПЕРЕЧНЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТАХ.....153

Черепанов Е. А.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ165

CONTENTS

FIRE SAFETY

- Alexey V. Karpov, Sergey A. Luchkin, Alexander V. Gomozov**
THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR DETERMINING FIRE RISK TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF FIRE PROTECTION OF STAIRCASES3
- Andrey Yu. Mokryak, Tatiana P. Sysoeva, Anna V. Mokryak**
FIRE HAZARD OF SHIP CABLES DURING OVERCURRENTS23
- Dmitry S. Nikishov, Ildar F. Khafizov, Evgeny A. Spynu, Artyom A. Kolesnik**
ESTIMATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE TAKING INTO ACCOUNT THE PREMISES LEAKAGE COEFFICIENT AND NON-ADIABATICITY OF THE COMBUSTION PROCESS37
- Viktoria Y. Kolesova, Nikita O. Melnikov, Anton A. Monakhov, Ekaterina V. Golovina**
EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF FLAME RETARDANT MIXTURES FOR WOOD FIRE PROTECTION.....52
- Oksana V. Bezzaponnaya, Pavel A. Glukhikh, Marina V. Elfimova, Sergey V. Makarkin**
DIAGNOSTICS OF FORMATION OF SECONDARY FIRE SOURCES IN THE STUDY OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS67
- Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov**
EXPERIMENTAL STUDY OF INCREASING THE STABILITY OF HIGHLY DISPERSED WATER MIST78
- Denis Yu. Grigoriev, Vitaly V. Pleshakov, Igor A. Uvarov, Alla Yu. Khokhlova**
THE PROBLEMS OF LACK OF PROJECT DOCUMENTATION IN TERMS OF ENSURING FIRE SAFETY OF THE OPERATED PROTECTION FACILITY90
- Aleksandr G. Firsov, Marina V. Zagumennova, Tatyana A. Chechetina**
AIR CONDITIONERS: FIRE DANGER, POTENTIAL RISKS OF FIRE CONSEQUENCES AND PROSPECTS IN ENSURING FIRE SAFETY108
- Ildar F. Khafizov, Rifkat M. Sultanov, Evgeny A. Spynu, Emir A. Galiakhmetov**
THE DEVELOPMENT OF THE MODIFIED METHOD FOR TESTING SAMPLES OF PYROPHORIC DEPOSITS FORMED IN STORAGE TANKS FOR SULFUR-CONTAINING OILS AND PETROLEUM PRODUCTS FOR PYROPHORIC ACTIVITY127

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

- Gennadiy A. Tsvetkov, Andrey N. Kokovin, Petr S. Poturaev**
IDENTIFICATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES USING A CASCADE OF NEURAL NETWORKS DURING SEARCH AND RESCUE OPERATIONS136
- Anatoly V. Rybakov, Pavel A. Yanyshv**
THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING A LIST OF MEASURES TO REDUCE DAMAGE FROM POSSIBLE ACCIDENTS AT OIL REFINERIES153
- Evgeny A. Cherepanov**
INFORMATION SUPPORT FOR THE RATIONAL PLACEMENT OF A FIRE-FIGHTING WATER SUPPLY SYSTEM165

УДК 614.841

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСТНИЧНЫХ КЛЕТОК

Карпов Алексей Васильевич, Лучкин Сергей Алексеевич, Гомозов Александр Васильевич
Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России,
г. Балашиха, Российская Федерация

Аннотация. Положениями нормативных документов в области пожарной безопасности установлены требования к размерам простенков между окнами помещений и лестничных клеток, направленные на ограничение распространения опасных факторов пожара по фасаду здания из горящих помещений в объем лестничных клеток. Вместе с тем эти требования не имеют исчерпывающего характера, позволяющего обеспечить их применение для всех проектных решений, имеющих место на практике.

Современное противопожарное нормирование предполагает возможность обоснования отступлений от нормативных требований, а также обоснование отсутствующих нормативных требований на основе определения пожарного риска.

Однако наличие таких обоснований требует развития соответствующей методологии определения пожарного риска, которое проанализировано в настоящей статье.

Проведенные расчеты динамики распространения опасных факторов пожара в обычные лестничные клетки показали, что временные интервалы их блокирования опасными факторами пожара в большей степени зависят от скорости ветра, отчего возникает необходимость учета характерных для различных регионов значений скорости ветра, определенных нормативными документами, при утверждении обоснований.

Моделирование распространения пожара с горящего балкона в оконные проемы лестничной клетки показало, что при одновременном пожаре в жилом помещении и на балконе распространение опасных факторов пожара по фасаду здания имеет значительно более интенсивный характер, чем при пожаре только в пределах балкона.

Кроме того, на распространение пожара, как показали расчеты, влияет конструктивное исполнение балконного ограждения.

Необходимо также учитывать горение помещений, имеющих выход на балкон, а также условия разрушения светопрозрачного ограждения балконов.

Лестничные клетки являются не только путем эвакуации, но и безопасным способом спасения пожарными подразделениями людей, которые не могут самостоятельно эвакуироваться из здания, а в ряде случаев — пожаробезопасными зонами.

С учетом этого необходимо защитить находящихся в лестничной клетке людей от пожара в смежных помещениях достаточно продолжительный период времени, т. е. обеспечить огнестойкость стен лестничных клеток, в связи с чем этот фактор должен быть учтен при развитии методологических положений определения пожарного риска.

Показано, что для прогнозирования распространения опасных факторов пожара из окон горящих помещений или с балконов по фасаду здания в окна лестничных клеток с учетом влияния ветра должно быть использовано полевое моделирование динамики пожара с конкретной моделью турбулентности, позволяющей учесть влияние естественной конвекции. Теплоперенос излучением рекомендуется учитывать на основе метода дискретного радиационного переноса, а радиационные свойства продуктов горения могут быть определены согласно модели взвешенной суммы серых газов с конкретными коэффициентами аппроксимации. Кроме того, должны учитываться эффекты горения находящихся на фасаде материалов.

Был сделан вывод о том, что для дополнения изложенных в статье математических соотношений по определению безопасности людей, находящихся в лестничной клетке, требуется разработать методологию расчета временных интервалов прибытия пожарных подразделений к людям и окончания спасательных работ с учетом общего количества спасаемых и персонала пожарных подразделений.

Ключевые слова: пожарный риск, пожаробезопасная зона, возможность спасения, время начала спасения, время окончания спасения, математическая модель, ширина простенка, предельные значения опасных факторов пожара

Для цитирования: Карпов А. В., Лучкин С. А., Гомозов А. В. Развитие методологии определения пожарного риска для оценки эффективности противопожарной защиты лестничных клеток // Техноферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 3–22.

THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR DETERMINING FIRE RISK TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF FIRE PROTECTION OF STAIRCASES

Alexey V. Karpov, Sergey A. Luchkin, Alexander V. Gomozov

All-Russian Research Institute of Fire Defense of EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation

Abstract. The provisions of regulatory documents in the field of fire safety provide requirements for the dimensions of the partitions between the windows of rooms and the windows of staircases, aimed at limiting the spread of dangerous fire factors along the facade of the building from burning premises into the volume of staircases. At the same time, these requirements are not exhaustive, allowing for their application to all design decisions that occur in practice.

Modern fire safety regulation assumes the possibility of justifying deviations from regulatory requirements, as well as justification of missing regulatory requirements based on the determination of fire risk.

However, the presence of such justifications requires the development of the appropriate methodology for determining fire risk, which is analyzed in this article.

Calculations of the dynamics of the spread of the fire danger into ordinary staircases showed that the time intervals for their blocking by dangerous fire factors depend to a greater extent on the wind speed that results in necessity of taking into account the wind speed values characteristic of different regions determined by regulatory documents, when approving the justifications.

Modeling the spread of fire from a burning balcony into the window openings of the staircase showed that with simultaneous fire in residential premises and on a balcony, the spread of dangerous fire factors along the facade of the building is significantly more intense than in the case of fire only within the balcony.

In addition, as calculations have shown, the spread of fire is influenced by the design of the balcony railing.

It is also necessary to take into account the burning of premises with an exit to the balcony, as well as the conditions for the destruction of the translucent railing of the balconies.

Staircases are not only an evacuation route, but also a safe way for fire departments to rescue people who cannot independently evacuate from buildings, and in some cases, fire-safe zones.

Taking this into account, it is necessary to protect people in the staircase from fire in adjacent rooms for a sufficiently long period of time, i.e., to ensure fire resistance of the staircase walls. In this connection, this factor should be considered when developing methodological provisions for determining fire risk.

It is shown that in order to predict the spread of dangerous fire factors from the windows of burning premises or from burning balconies along the facade of a building to the windows of staircases, considering the influence of wind, field modeling of fire dynamics with a specific turbulence model that allows taking into account the influence of natural convection should be used.

It is also recommended to consider the heat transfer by radiation based on the discrete radiation transfer method, and the radiation properties of combustion products can be determined according to the weighted sum of gray gases model with specific approximation coefficients. In addition, the effects of combustion of materials on the facade should be considered as well.

It is concluded that in order to supplement the mathematical relationships presented in the article for determining the safety of people in the staircase, it is necessary to develop the methodology for calculating the time intervals for the arrival of fire departments to people and the completion of rescue operations, taking into account the total number of people being rescued and the personnel of the fire departments.

Keywords: fire risk, fire-safe zone, rescue possibility, rescue start time, rescue end time, mathematical model, partition width, maximum values of dangerous fire factors

For Citation: Karpov A. V., Luchkin S. A., Gomozev A. V. The development of the methodology for determining fire risk to assess the effectiveness of fire protection of staircases // *Technospheric Safety*. 2025. № 1 (46). pp. 3–22.

Введение

Для ограничения распространения пожара по фасаду из окон горящих помещений в оконные проемы лестничных клеток положениями [1] предусмотрены требова-

ния к ширине простенков — глухих участков наружной стены с нормируемым пределом огнестойкости, расположенных между смежными по горизонтали проемами помещений и лестничных клеток. Вместе с тем в [1] не приведен исчерпывающий перечень

помещений с указанием необходимых размеров простенков, а кроме того, на практике часто возникает необходимость проектирования простенков, размеры которых не соответствуют нормативным требованиям. Кроме того, в [1] не дифференцированы требования к размерам простенков для лестничных клеток с открываемыми окнами (типа Л1, Н1 и Н3) и лестничных клеток (типа Н2) с неоткрываемыми окнами.

Необходимо также учитывать, что в нормативных документах [1, 2] отсутствуют требования к ширине простенка между балконами, окнами лестничной клетки, выполняющей функции пожаробезопасной зоны, окнами смежных помещений и др.

Перечисленные выше обстоятельства обуславливают необходимость проведения расчетного обоснования невыполнения нормативных требований, а также мероприятий, предусматриваемых из-за отсутствия противопожарных требований.

Существующая методика определения пожарного риска [3] базируется на сравнении времени блокирования путей эвакуации, в т. ч. в лестничной клетке, опасными факторами пожара (далее — ОФП), которые распространяются через помещения и коридоры внутри здания, со временем эвакуации людей. При этом не учитывается возможность наружного распространения ОФП в окна лестничной клетки из оконных проемов горящих помещений и с балконов.

Также не учитывается необходимость обеспечения безопасного нахождения маломобильных групп населения (далее — МГН) на площадках лестничных клеток, выполняющих функции пожаробезопасных зон 4-го типа, а также их спасения.

Статья посвящена анализу возможных направлений развития методологии опре-

деления пожарного риска, позволяющих предусмотреть приведенные выше обстоятельства с учетом результатов современных исследований в этой области.

Анализ проектных решений, обоснование которых требует развития методики определения пожарного риска

Анализ проектных решений по противопожарной защите лестничных клеток, обоснование которых требует развития методологии определения пожарного риска, показал следующее.

Положениями [1] предусмотрена возможность проектирования лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами в наружных стенах (рис. 1а) при обосновании принятых решений по исключению их блокирования ОФП расчетами пожарного риска [3]. При этом в [1] указано, что его допускается не проводить при условии, что минимальное расстояние, измеренное по прямой линии, от открытых проемов лестничных клеток до оконных и дверных проемов, не имеющих противопожарного заполнения, а также до конструкций из горючих материалов должно быть не менее 6 м. Вместе с тем проведенная в [4] с применением полевой модели пожара проверка эффективности положений [1] позволила установить, что в случае возгорания в жилом помещении расстояние, равное 6 м, является недостаточным для обеспечения возможности безопасной эвакуации людей, следовательно, обоснование проектных решений при расстоянии более 6 м также должно базироваться на определении пожарного риска. Кроме того, было установлено, что блокирование площадок лест-

ничной клетки, расположенных у открытых проемов в ее наружных стенах, в значительной степени зависит от скорости ветра.

В частности, как видно из рис. 2, при пожаре в жилом помещении, когда $L = 4$ м и $W = 2$ м/с, время блокирования лестнич-

ной клетки за счет повышения концентрации HCl выше предельного значения будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 450$ с (кривая 1 на рис. 2), а при $W = 4$ м/с и $W = 6$ м/с время блокирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 330$ с и $t_{\text{бл.лк}} = 240$ с соответственно (кривые 2 и 3 на рис. 2).

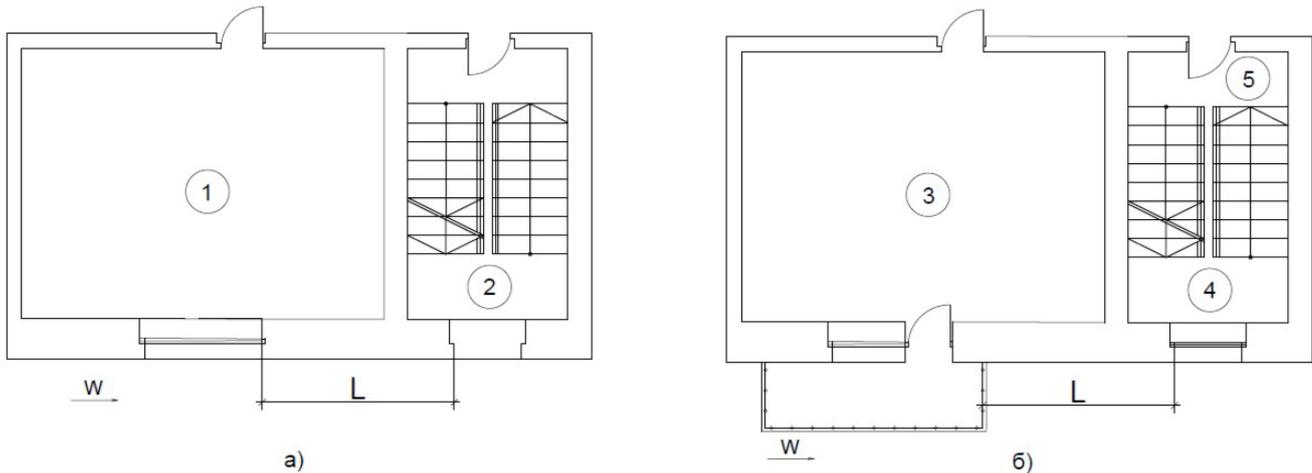


Рис. 1. Анализируемая схема распространения ОФП из окна (балкона) горящего помещения в окно лестничной клетки:

- 1 — жилое помещение с окном;
 - 2 — промежуточная площадка лестничной клетки с открытым проемом;
 - 3 — жилое помещение с балконом;
 - 4 — промежуточная площадка лестничной клетки с окном;
 - 5 — этажная площадка лестничной клетки (пожаробезопасная зона 4-го типа);
- L — ширина простенка;
 W — скорость ветра

Fig. 1. The analyzed scheme of spread of dangerous fire factors from the window (balcony) of the burning premises to the staircase window:

- 1 — residential premises with a window;
 - 2 — intermediate landing of the staircase with an open doorway;
 - 3 — residential premises with a balcony;
 - 4 — intermediate landing of the staircase with a window;
 - 5 — floor landing of the staircase (fire-safe zone of the 4th type);
- L — width of the partition;
 W — wind speed

Указанный фактор ветрового воздействия необходимо учитывать при прогнозировании распространения ОФП из окон горящих помещений в оконные проемы лестничной клетки. В настоящее время в нормативных документах не определены значения скорости ветра и его направление, которые должны быть использованы при обосновании проектных решений.

Также необходимо установить порядок определения размеров открытой части оконных проемов горящих помещений, из которых продукты горения распространяются на фасад здания и далее в открытые проемы лестничной клетки.

Таким образом, для реализации требований нормативного документа [1] по обоснованию проектных решений, исключая-

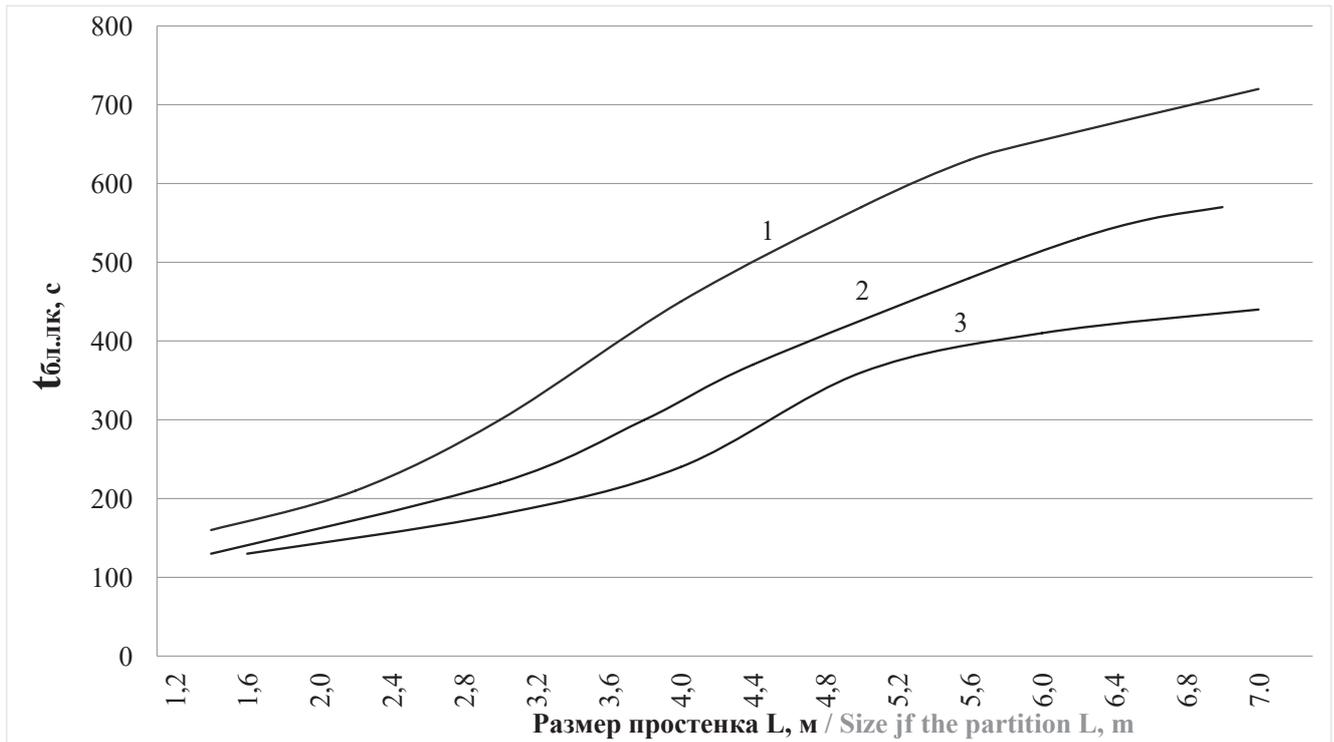


Рис. 2. Зависимость времени блокирования промежуточной площадки лестничной клетки с открытыми проемами в случае пожара в жилом помещении (рис. 1а) от W :
1 — $W = 2$ м/с; 2 — $W = 4$ м/с; 3 — $W = 6$ м/с

Fig. 2. Dependence of the blocking time of the intermediate landing of the staircase with open doorways in case of fire in the residential premises (Fig. 1a) on wind speed W :
1 — $W = 2$ m/s; 2 — $W = 4$ m/s; 3 — $W = 6$ m/s

щих блокирование ОФП лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами в наружных стенах, необходимо развитие положений, определяющих наружное распространение пожара, с целью дальнейшего их внедрения в методику определения пожарного риска.

Очевидно, что в перспективе обоснование проектных решений по размещению окон лестничных клеток типа Л1, Н1 и Н3 относительно балконов и окон смежных помещений также будет базироваться на определении пожарного риска. Для этого необходима методология, позволяющая определить размеры открытой части их оконных проемов. При этом необходимо дополнительно учитывать, что лестничные клетки типа Л1 в многоквартирных жилых зданиях могут выполнять функции пожа-

робезопасных зон 4-го типа и тогда порядок определения размеров открытой части оконных проемов в них может отличаться от общего порядка.

Кроме того, в дальнейшем для прогнозирования распространения ОФП в окна лестничных клеток типа Н2, а также в неоткрываемые части окон лестничных клеток типа Л1, Н1 и Н3 необходимо определить критерии, позволяющие сделать вывод о разрушении оконного остекления под воздействием пожара с внешней стороны, после которого безопасность людей в лестничной клетке не будет обеспечена на необходимом уровне.

Прогнозирование распространения пожара с горящего балкона в оконные проемы лестничной клетки имеет следующие специфические особенности (рис. 1б). Расчеты

показывают, что распространение ОФП по фасаду здания при пожаре одновременно и в жилом помещении, и на балконе имеет значительно более интенсивный характер, чем при пожаре только в пределах балкона.

Так, значение температуры газовой среды пожара в непосредственной близости от фасада здания, превышающей значение $t_{кр.} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при этой температуре начинается разрушение остекления), в случае горения только балкона возникнет на расстоянии $L = 0,9\text{ м}$ при $W = 2\text{ м/с}$ и на расстоянии $L = 1,9\text{ м}$ при $W = 6\text{ м/с}$ соответственно (кривые 1 и 2 на рис. 3).

В случае же одновременного горения как балкона, так и жилого помещения значение температуры газовой среды пожара в непосредственной близости от фасада здания, превышающей значение $t_{кр.} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, будет замечено на расстоянии $L = 2,4\text{ м}$ при $W = 2\text{ м/с}$ и на расстоянии $L = 4,8\text{ м}$ при $W = 6\text{ м/с}$ соответственно (кривые 3 и 4 на рис. 3).

Кроме того, расчеты показывают, что устройство на балконе нижнего ограждения (экрана) из негорючих материалов, которое не разрушится при пожаре, позволяет значительно сузить область зоны горения на фаса-

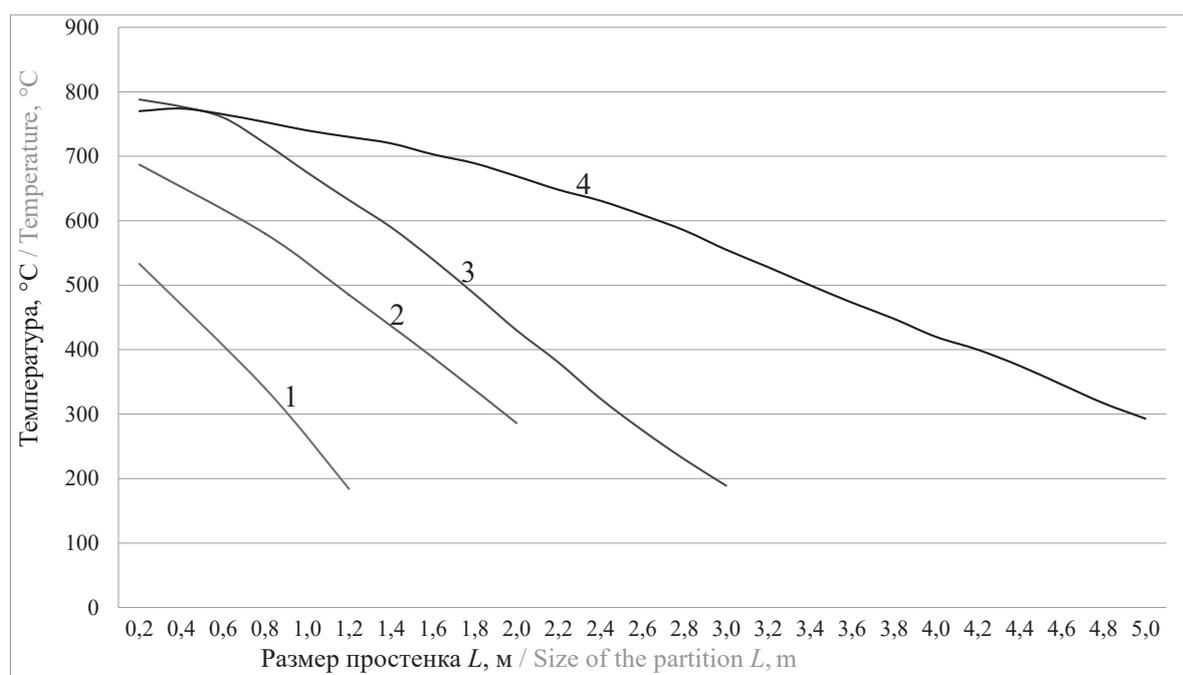


Рис. 3. Изменение температуры продуктов горения в зависимости от L при пожаре в жилом помещении с балконом (рис. 1б):

- 1 — горение балкона при $W = 2\text{ м/с}$;
- 2 — горение балкона при $W = 6\text{ м/с}$;
- 3 — горение балкона и жилого помещения при $W = 2\text{ м/с}$;
- 4 — горение балкона и жилого помещения при $W = 6\text{ м/с}$

Fig. 3. Change in the temperature of combustion products depending on L during the fire in the residential premises with a balcony (Fig. 1b):

- 1 — balcony burning at $W = 2\text{ м/с}$;
- 2 — balcony burning at $W = 6\text{ м/с}$;
- 3 — balcony and the residential premises burning at $W = 2\text{ м/с}$;
- 4 — balcony and the residential premises burning at $W = 6\text{ м/с}$

де здания, в которой тепловое воздействие пожара на оконное остекление лестничной клетки будет превышать критическое значение и приводить к его разрушению.

Так, значение падающего на окно лестничной клетки теплового потока, превышающее значение $q_{пр} = 12,5 \text{ кВт/м}^2$ (при этом значении теплового потока может начинаться

разрушение оконного остекления лестничной клетки), в случае пожара в жилом помещении и на открытом балконе будет возможно на расстоянии $L = 4,1 \text{ м}$ при $W = 6 \text{ м/с}$ и на расстоянии $L = 2 \text{ м}$ при $W = 2 \text{ м/с}$ соответственно (см. кривые 1 и 2 на рис. 4).

Если балкон имеет экран, который не будет разрушен пожаром, то значение тепло-

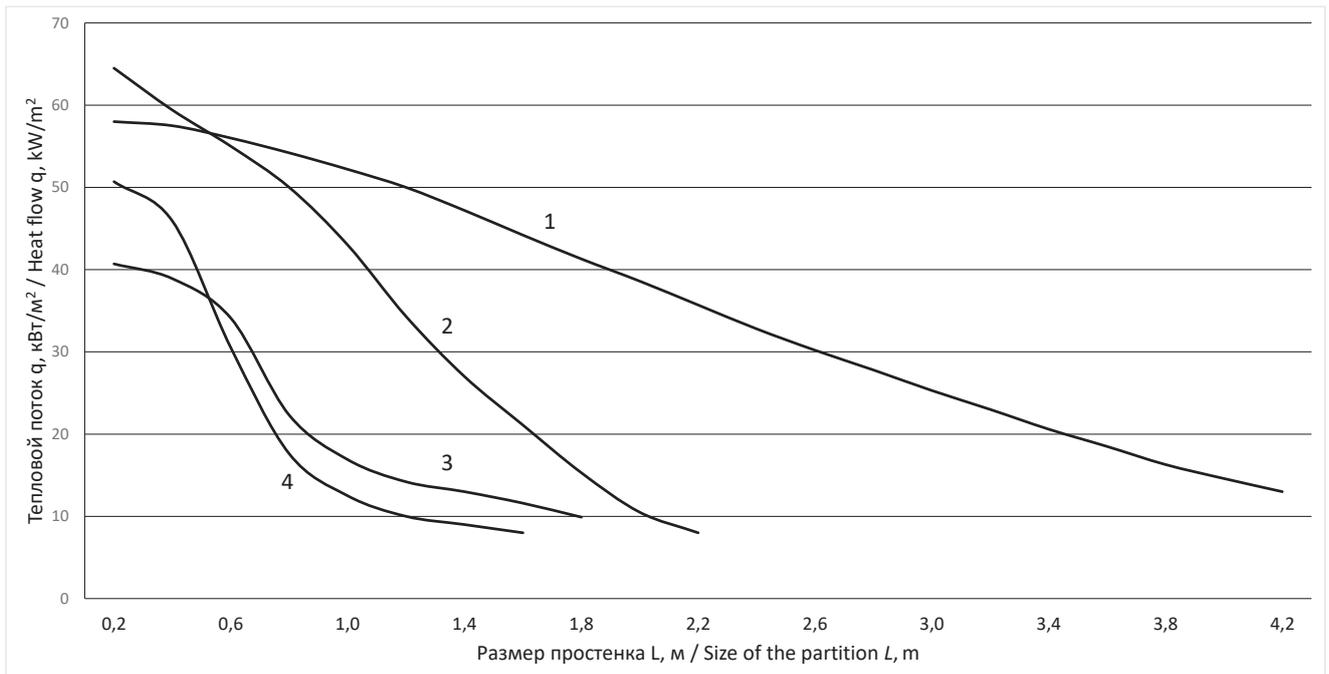


Рис. 4. Изменение тепловых потоков, падающих в плоскость оконного проема лестничной клетки, в зависимости от размера L при пожаре в жилом помещении с балконом (рис. 1б):

- 1 — при открытом балконе и $W = 6 \text{ м/с}$;
- 2 — при открытом балконе и $W = 2 \text{ м/с}$;
- 3 — при балконе с нижним ограждением и $W = 6 \text{ м/с}$;
- 4 — при балконе с нижним ограждением и $W = 2 \text{ м/с}$

Fig. 4. Change in heat flows falling into the plane of the window opening of the staircase, depending on the size L during the fire in a residential building with a balcony (Fig. 1b):

- 1 — with an open balcony and $W = 6 \text{ м/с}$;
- 2 — with an open balcony and $W = 2 \text{ м/с}$;
- 3 — with a balcony having a lower railing and $W = 6 \text{ м/с}$;
- 4 — with a balcony having a lower railing and $W = 2 \text{ м/с}$

вого потока, превышающее значение $q_{пр} = 12,5 \text{ кВт/м}^2$, будет иметь место на расстоянии $L = 1,4 \text{ м}$ при $W = 6 \text{ м/с}$ и на расстоянии $L = 0,9 \text{ м}$ при $W = 2 \text{ м/с}$ соответственно (см. кривые 3 и 4 на рис. 4).

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость учета совместного

горения балконов и жилых помещений, а также определения критериев разрушения наружного светопрозрачного ограждения, в т. ч. экрана.

Проектирование пожаробезопасных зон 4-го типа в лестничных клетках типа Л1 в жилых зданиях, согласно [2] (рис. 1б), предпо-

лагают, что такая лестничная клетка должна обеспечивать безопасность не только эвакуации всех мобильных людей, но и нахождения на ее этажных площадках МГН группы мобильности М4 до момента начала их спасения пожарными подразделениями. При этом следует учитывать, что безопасное перемещение спасаемых наружу при необходимости может быть обеспечено пожарными подразделениями с использованием изолирующих самоспасателей, огнестойких накидок и др.

На рис. 5 представлены результаты расчетов динамики изменения концентрации ОФП на этажных и промежуточных площадках лестничной клетки типа Л1, выполняющей функции пожаробезопасной зоны 4-го типа, при пожаре на балконе 2-го этажа с ограждением, при $L = 7$ м и $W = 6$ м/с.

Расчеты показали, что при пожаре одновременно и на балконе, и в квартире наиболее быстрое блокирование лестничной клетки ОФП происходит за счет превышения концентрации HCl предельно допустимых значений.

При этом время блокирования расположенной на 3-м этаже площадки лестничной клетки (зоны возможного размещения МГН) составляет $t_{\text{бл.лк}} = 650$ с, а время блокирования промежуточной площадки, расположенной между 2-м и 3-м этажами, составляет $t_{\text{бл.лк}} = 580$ с (кривые 3 и 2 на рис. 5).

Для площадок вышележащих этажей значение времени блокирования $t_{\text{бл.лк}}$ увеличивается. В частности, значение времени блокирования лестничной площадки 4-го этажа составляет $t_{\text{бл.лк}} = 820$ с, а площадки 5-го этажа — $t_{\text{бл.лк}} = 1\ 220$ с (кривые 4 и 5 на рис. 5).

При этом значение температуры в зоне промежуточной площадки не превышает

допустимого значения 70 °С (кривую 1 на рис. 5).

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы. Безопасность человека, находящегося на площадке 3-го этажа, будет обеспечена только до момента $t_{\text{бл.лк}} = 650$ с, до которого он должен быть перемещен пожарными подразделениями с этой площадки по лестничной клетке наружу. При этом его перемещение будет осуществляться через промежуточную, расположенную ниже, у окна, площадку лестничной клетки, где значение концентрации HCl во время перемещения может быть выше предельно допустимых значений (кривую 2 на рис. 5), что обуславливает необходимость надевания на спасаемого средств защиты органов дыхания (далее — СИЗОД). В то же время, поскольку значение температуры в зоне промежуточной площадки в момент перемещения спасаемого не будет превышать допустимого значения (кривую 1 на рис. 5), дополнительная защита от воздействия температуры не потребует.

Аналогичным образом МГН, находящиеся на площадках 4-го и 5-го этажей, должны быть перемещены с этих площадок по лестничной клетке наружу до момента $t_{\text{бл.лк}} = 820$ с и $t_{\text{бл.лк}} = 1\ 220$ с соответственно. При этом их безопасное передвижение может происходить только с надетыми СИЗОД, поскольку значения концентрации HCl в процессе перемещения через расположенные ниже площадки лестничной клетки могут быть выше предельно допустимых значений (кривые 4, 5 на рис. 5).

Очевидно, что подтверждение возможности своевременного прибытия пожарных подразделений к первому спасаемому и безопасного последовательного перемещения людей с разных площадок лестничной клет-

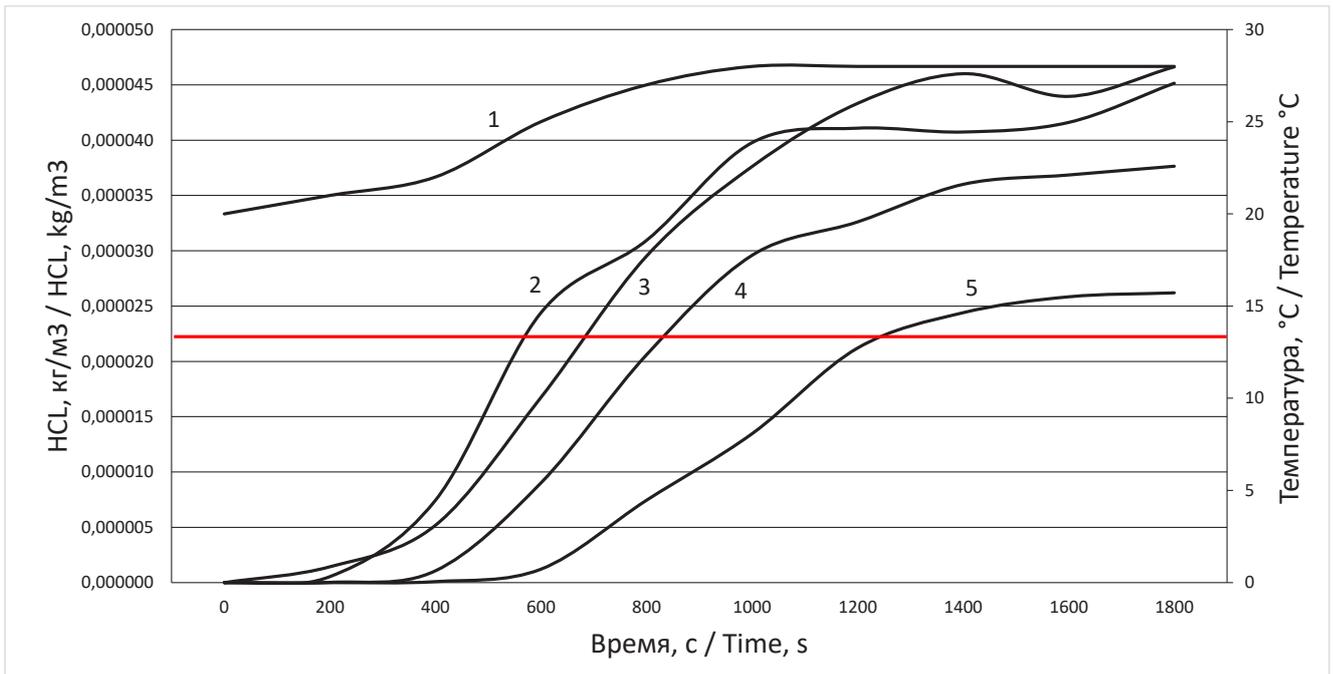


Рис. 5. Динамика изменения концентрации ОФП в лестничной клетке, выполняющей функции пожаробезопасной зоны 4-го типа, при пожаре в жилом помещении с балконом (рис. 1б) при $W = 6$ м/с и $L = 7$ м:

- 1 — температура в зоне промежуточной площадки;
- 2 — HCl в зоне промежуточной площадки;
- 3 — HCl в зоне этажной площадки 2-го этажа;
- 4 — HCl в зоне этажной площадки 3-го этажа;
- 5 — HCl в зоне этажной площадки 4-го этажа

Fig. 5. Dynamics of changes in the concentration of dangerous fire factors in the staircase, which functions as a type 4 fire-safe zone, during the fire in the residential premises with a balcony (Fig. 1b) at $W = 6$ m/s and $L = 7$ m:

- 1 — temperature in the intermediate landing zone;
- 2 — HCl concentration in the intermediate landing zone;
- 3 — HCl concentration in the 2nd floor landing zone;
- 4 — HCl concentration in the 3rd floor landing zone;
- 5 — HCl concentration in the 4th floor landing zone

ки наружу обуславливает необходимость развития новой методологии для определения безопасности находящихся в лестничной клетке МГН. При этом должен быть установлен порядок определения количества МГН группы мобильности М4 в лестничной клетке, времени прибытия пожарных подразделений к первому и каждому последующему спасаемому, а также общее время окончания спасательных работ.

Необходимо также учитывать, что современные представления о функциональ-

ной роли лестничных клеток в системе обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений предполагают, что лестничные клетки являются безопасным путем спасения пожарными подразделениями людей, которые не могут самостоятельно эвакуироваться из зданий: немобильных и малолетних пациентов больниц, специализированных дошкольных образовательных организаций, домов престарелых и т. д. Кроме того, обозначенная функциональная роль наиболее актуальна для расположен-

ных в секциях многоквартирных жилых зданий лестничных клеток, являющихся единственным путем эвакуации, а также перемещения наружу спасаемых немобильных жильцов и детей, оставшихся в квартирах без взрослых.

С учетом вышеизложенного необходимы дополнительные новые методологические положения для определения безопасности как находящихся в лестничной клетке МГН, так и спасаемых по лестничной клетке людей. Апробация этих положений позволит дополнить существующие методики определения пожарного риска.

Эти положения должны отражать порядок расчетов временных интервалов действий пожарных подразделений, а также методов, позволяющих определить количество различных групп спасаемых на каждом этаже.

Следует учитывать, что возможность безопасного нахождения людей в лестничной клетке как на стадии эвакуации, так и на стадии спасения возможна только при условии, что внутренние стены лестничной клетки обеспечивают защиту от распространения пожара из смежных помещений в объем лестничной клетки, т. е. обладают необходимой огнестойкостью.

Интервал времени от начала пожара до окончания эвакуации из большинства зданий, как показывают расчеты, может варьироваться от 3 до 10 мин.

Очевидно, что внутренние стены лестничных клеток с пределом огнестойкости не менее REI 15 в зданиях со степенью огнестойкости не ниже IV позволят обеспечить необходимую защиту людей при эвакуации.

Вместе с тем для зданий, имеющих V степень огнестойкости, предел огнестойкости внутренних стен лестничных клеток не нормируется, что предполагает возможность

использования конструкций с неопределенными значениями пределов огнестойкости. С учетом этого корректно оценить возможность распространения пожара из горящего помещения в лестничную клетку до момента окончания эвакуации даже для зданий, имеющих V степень огнестойкости, не представляется возможным, и необходимы новые положения определения пожарного риска, позволяющие учесть это обстоятельство.

Интервал времени от начала пожара до окончания спасения людей определяется как сумма интервалов времени от момента начала пожара до сообщения о нем в пожарную часть, времени прибытия пожарных подразделений к зданию, времени нахождения пожарными спасаемого, его подготовки к перемещению и непосредственная эвакуация человека.

Величина обозначенного интервала времени, как показано в [5], [6], [7], даже для 2-этажных зданий составляет не менее 18 мин в случае, если необходимо спасти только одного человека, а здание расположено в пределах городского поселения, и не менее 28 мин в случае, если необходимо спасти только одного человека, а здание расположено в пределах сельского поселения.

Это означает, что необходимо обеспечить защиту находящихся в лестничной клетке людей от пожара в смежных помещениях достаточно продолжительный период времени. Следовательно, фактор огнестойкости внутренних стен лестничных клеток играет существенную роль при оценке безопасности находящихся в ней людей на стадии эвакуации в зданиях V степени огнестойкости, а также на стадии спасения из зданий всех типов огнестойкости.

Поскольку существующая методика определения пожарного риска не учитывает фактор огнестойкости, он должен быть учтен в дальнейшем, при ее развитии, в т. ч. на основе данных об эквивалентной продолжительности пожара [8].

Развитие критериев, математических соотношений и условий однозначности для оценки пожарного риска

Проведенный выше анализ позволяет сделать вывод, что определение пожарного риска для оценки эффективности систем противопожарной защиты лестничных клеток потребует в перспективе подтверждения соответствия этих систем следующим новым критериям.

- Обеспечено ограничение распространения ОФП в лестничную клетку через проемы смежных помещений и коридоров, через внутренние стены лестничных клеток, а также через проемы в наруж-

ных стенах лестничной клетки до необходимого уровня.

- Обеспечена возможность безопасной эвакуации всех мобильных людей по лестничной клетке.
- Обеспечена возможность безопасного нахождения в лестничной клетке МГН группы мобильности М4 до момента начала их спасения пожарными подразделениями.
- Обеспечена возможность спасения путем перемещения по лестничной клетке наружу немобильных людей и малолетних детей, а также МГН группы мобильности М4, находящихся в лестничной клетке.

Количественная оценка эффективности систем противопожарной защиты лестничных клеток также потребует в дальнейшем развития математических соотношений, которые должны быть использованы для определения пожарного риска.

Возможность безопасной эвакуации по лестничной клетке описывается соотношением:

$$0,8 t_{\text{бл}} \geq t_{\text{н.э.}} + t_p, \quad (1)$$

где $t_{\text{н.э.}}$ и t_p — время начала эвакуации и расчетное время эвакуации.

В случае пожара на балконе необходимо дополнить методику определения пожарного риска положениями о порядке определения времени начала эвакуации $t_{\text{н.э.}}$ с учетом того, что балконы не защи-

щены системами пожарной сигнализации (далее — СПС).

Условие возможности безопасного нахождения на этажных площадках лестничной клетки МГН группы мобильности М4 до момента начала их спасения пожарными подразделениями описывается соотношением:

$$0,8 t_{\text{бл.лк}} \geq T_{\text{нач.спас}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{нач.спас}}$ — время начала спасения МГН группы мобильности М4 из лестничной

клетки, осуществляемого подразделениями пожарной охраны и соответствующее

интервалу времени от момента возникновения пожара до начала перемещения по-

следнего спасаемого наружу, определяемое из соотношения:

$$T_{нач.спас.} = t_c + t_{приб} + t_{пер} + t_{сп}, \tag{3}$$

где t_c — время от начала пожара до сообщения о нем в подразделение пожарной охраны; $t_{приб}$ — время от момента сообщения о пожаре до прибытия подразделения пожарной охраны к зданию, определяемое в соответствии с положениями ч. 1 ст. 76 № 123-ФЗ; $t_{пер}$ — время от прибытия подразделения пожарной охраны к зданию до

окончания перемещения к последнему спасаемому человеку; $t_{сп}$ — время подготовки к спасению (перекаладывание на носилки, надевание СИЗОД и т. д.).

Если интервал времени от момента срабатывания СПС до момента сообщения о пожаре в подразделение пожарной охраны равен t^* , то неравенство (2) будет иметь вид:

$$0,8 t_{бл.лк} \geq t_{пор} + t_{инерц} + t^* + t_{приб} + t_{пер} + t_{сп}. \tag{4}$$

Условие возможности спасения людей путем перемещения по лестничной клетке наружу немобильных людей и малолетних

детей, находящихся на этажах, а также МГН группы мобильности М4, находящихся в лестничной клетке, описывается соотношением:

$$0,8 t_{сп}^{бл.лк} \geq T_{ок.спас.}, \tag{5}$$

где $t_{сп}^{бл.лк}$ — время блокирования лестничной клетки на стадии спасения, определяемое с учетом предельно допустимых

значений ОФП для спасаемых людей с учетом возможного использования для их спасения СИЗОД:

$$t_{сп}^{бл.лк} = \min\{t_{сп}^{п.в.}, t_{сп}^m, t_{сп}^{m.г.}, t_{сп}^{кисл}, t_{сп}^{m.п.}\}, \tag{6}$$

где $t_{сп}^m$, $t_{сп}^{m.г.}$, $t_{сп}^{кисл}$, $t_{сп}^{m.п.}$ — время достижения ОФП предельно допустимых значений по температуре, концентрации токсичных продуктов горения, концентрации кислорода и теплового потока соответствен-

но на стадии спасения (с учетом используемых СИЗОД);

$T_{ок.спас.}$ — время окончания спасения человека по лестничной клетке, осуществляемого подразделениями пожарной охраны

и соответствующее интервалу времени от начала пожара до момента перемещения последнего спасаемого на безопасное расстояние от горящего здания.

Поскольку перемещение людей осуществляется пожарными подразделениями, в (6) не учитывается фактор потери види-

мости. Кроме того, при защите спасаемого изолирующим самоспасателем в (6) допускается не учитывать воздействие токсичных продуктов горения и снижение концентрации кислорода.

Время окончания спасения $T_{ок.спас}$ в (5) определяется из соотношения:

$$T_{ок.спас} = T_{нач.спас.} + t_{пер}^*, \quad (7)$$

где $t_{пер}^*$ — время перемещения последнего спасаемого наружу, на безопасное расстояние от горящего здания.

Для реализации расчетов по (2)–(7) необходимо разработать новые положения по определению временных интервалов прибытия пожарных подразделений к людям с дальнейшим их перемещением наружу исходя из общего количества спасаемых и числа пожарных подразделений, осуществляющих спасательные работы, аналогичные данным [9] для немобильных людей и др.

Кроме того, необходимо определить значение интервала времени от момента срабатывания СПС до сообщения о пожаре в подразделение пожарной охраны (равен t^*), а также интервала времени от начала пожара до сообщения о пожаре в подразделение пожарной охраны в случае отсутствия в здании СПС.

Развитие методологии определения пожарного риска предполагает актуализацию математических моделей, позволяющих прогнозировать распространение ОФП из окон горящих помещений или с балконов по фасаду здания в окна лестничных клеток с учетом влияния ветра.

Для этого должно быть использовано полевое моделирование динамики пожара, основанное на решении системы дифференциальных уравнений, получившее широкое распространение как в отечественной практике [10], так и за рубежом [11]. Модель турбулентности с поправкой на влияние естественной конвекции целесообразно принять согласно [12, 13]. Теплоперенос излучением рекомендуется учитывать на основе метода дискретного радиационного переноса [14], а радиационные свойства продуктов горения могут быть определены согласно модели взвешенной суммы серых газов [15] с коэффициентами аппроксимации [16].

Для оценки динамики распространения ОФП в окна лестничных клеток в случаях, когда отделка наружных стен зданий, облицовка, а также карнизные свесы выполнены с применением горючих материалов, в применяемых математических моделях должны учитываться эффекты горения находящихся на фасаде материалов по аналогии с [17, 18].

Скорость ветра, как показано выше, существенным образом влияет на время блокирования лестничной клетки ОФП. Очевидно, что корректно оценить значение скорости

ветра и его направление в момент пожара невозможно. Поэтому для прогноза динамики распространения ОФП в окна лестничных клеток может быть использовано некое расчетное значение скорости ветра, характерное для региона размещения объекта. Например, в качестве такой расчетной скорости ветра в [4, 20] принималась максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь согласно положениям табл. 3.1 СП 131.13330.2020 [19].

Очевидно, что в момент пожара реальная скорость ветра может превышать это значение. Поэтому в [20] дополнительно принималось, что ветер направлен вдоль фасада здания от окна горящего балкона к лестничной клетке.

Обозначенный подход соответствует базовым положениям действующей методики определения пожарного риска, согласно которым при расчетах должны рассматриваться сценарии пожара и исходные данные. В соответствии с ними реализуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей.

Необходимо учитывать, что район размещения объекта нельзя не учитывать при определении расчетной скорости ветра. Это связано с тем, что диапазон значений средних скоростей ветра по румбам за январь, согласно положениям табл. 3.1 СП 131.13330.2020, в пределах РФ меняется от 1,3 до 11,5 м/с. В связи с этим использование одного фиксированного значения скорости ветра для всех регионов РФ может привести к значительным ошибкам.

Однако из-за отсутствия в СП 131.13330.2020 подробных данных для всех населенных пунктов и районов возникает необходимость в рамках развития методики определения пожарного риска установить поря-

док определения расчетной скорости ветра в населенных пунктах и районах, не указанных в СП 131.13330.2020.

Следует также учитывать, что для лестничной клетки типа Л1, выполняющей функции пожаробезопасной зоны 4-го типа, нормативными документами в области пожарной безопасности не установлены дополнительные требования к размерам открываемых створок окон на каждом этаже. Проведенные расчеты распространения ОФП с горящих балконов в окна такой лестничной клетки выполнены в предположении, что площадь открываемых створок окон лестничной клетки на каждом этаже не превышает 0,6 м², а остальные створки могут открываться специальным ключом при необходимости их мытья, обслуживания и т. д. (рис. 5).

Указанные размеры открываемых створок позволяют ограничить распространение ОФП в объем лестничной клетки типа Л1, выполняющей функции пожаробезопасной зоны 4-го типа, и одновременно обеспечивают возможность ее эффективного проветривания в санитарных целях.

Поэтому в рамках работ по развитию методологии определения пожарного риска необходимо провести дополнительные исследования, позволяющие установить окончательный порядок определения размеров открытых оконных проемов как в горящих помещениях, так и в лестничных клетках. Кроме того, для лестничных клеток типа Л1, выполняющих функции пожаробезопасной зоны 4-го типа, необходимо обосновать и указать в нормативных документах допустимую площадь открываемых оконных створок.

Для окон лестничных клеток типа Н2, а также для неоткрываемой части окон

лестничных клеток типа Л1, Н1 и Н3 в [20] предложено принимать, что разрушение остекления начинается при воздействии на него со стороны фасада газовой среды пожара с температурой более 300 °С или падающего теплового потока более 12,5 кВт/м².

Эти положения требуют уточнений и дополнений для оконных стекол разных размеров, стеклопакетов с различным числом камер, балконного и огнестойкого остекления и т. д., подтвержденных результатами огневых испытаний.

Заключение

Для реализации широкого спектра проектных решений необходимы современные методологии, позволяющие обосновать невыполнение нормативных требований в части размеров простенков между окнами помещений и лестничных клеток, а также соответствующие размеры при отсутствии нормативных требований.

В работе проанализированы основные направления развития существующей методики определения пожарного риска, позволяющие реализовать указанные задачи.

Показано, что при расчетах динамики распространения пожара из окон горящих

помещений и с балконов в окна лестничных клеток необходимо учитывать скорость ветра в районе размещения объекта.

Представленный в статье анализ показал, что для подтверждения возможности своевременного прибытия пожарных подразделений к первому спасаемому и безопасного последовательного перемещения людей с разных площадок лестничной клетки необходимо развитие новых методологий, позволяющих оценить безопасность находящихся там МГН. После необходимой апробации они будут использованы для дополнения действующих методик определения пожарного риска.

Если проектные решения предусматривают применение на наружных поверхностях зданий горючих материалов, то используемые математические модели должны учитывать эффекты, связанные с их горением.

Полученные результаты определяют направления развития методологии определения пожарного риска, позволяющей учесть эффект распространения пожара по фасаду здания в лестничные клетки. Их применение позволяет уточнить соответствующие нормативные положения, своды правил по пожарной безопасности, а также обосновать отсутствующие требования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты : свод правил : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 12 марта 2020 г. № 151 // введен взамен СП 2.13130.2012 : дата введения 2020-09-12 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248963> (дата обращения: 15.07.2024).

2. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы : свод правил : утвержден и введен приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 19 марта 2020 г. № 194 : введен взамен СП 1.13130.2009 : дата введения 2020-09-19 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248961> (дата обращения: 15.07.2024).

3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300260998?marker=6540IN> (дата обращения: 15.07.2024).

4. Апробация и анализ нормативных требований по защите лестничных клеток с открытыми проемами при распространении пожара по фасаду / А. В. Пехотиков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 1. С. 5–14. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2024.33.01.5-14>.

5. Анализ влияния фактора огнестойкости строительных конструкций на обеспечение безопасности людей при пожаре / А. В. Пехотиков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 33, № 3. С. 49–62.

6. Оценка возможности спасения людей при пожаре в жилом здании / А. В. Пехотиков [и др.] // Пожарная безопасность. 2021. № 3 (104). С. 86–97.

7. Анализ технических решений по противопожарной защите обычных лестничных клеток при реконструкции секционных жилых зданий / А. В. Пехотиков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2023. Т. 32, № 2. С. 59–70. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70>.

8. Шебеко Ю. Н., Шебеко А. Ю., Гордиенко Д. М. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 31–39.

9. Эвакуация и поведение людей при пожарах : учебное пособие / В. В. Холщевников [и др.]. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.

10. Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений / А. С. Ярош [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56.

11. A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires / D. Cortés et al. // Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (1). pp. 1–18. DOI: <https://10.3390/app10165609>.

12. Launder, B. E., Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. № 3 (2). pp. 269–289. DOI: [https://10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://10.1016/0045-7825(74)90029-2).

13. Hossain M. S., Rodi W. A turbulence model for buoyant flows and its application for vertical buoyant jets // Turbulent Buoyant Jets and Plumes (Rodi W. ed.). HMT Series: Oxford, England. 1982. Vol. 6. pp. 121–172.

14. Lockwood, F. C., Shah, N. G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Proceedings of the Symposium (International) on Combustion. 1981. № 18 (1). pp. 1405–1414. DOI: [https://10.1016/S0082-0784\(81\)80144-0](https://10.1016/S0082-0784(81)80144-0).
15. Bressloff, N. W., Moss, J. B., Rubini, P. A. Assessment of a differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation as applied in the discrete transfer radiation model. Numerical heat transfer, Part B // An International Journal of Computation and Methodology. 1996. № 29 (3). pp. 381–397. DOI: <https://10.1080/10407799608914988>.
16. Truelove J. S. The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1984. №. 27 (3). pp. 464–466. DOI: [https://10.1016/0017-9310\(84\)90294-1](https://10.1016/0017-9310(84)90294-1).
17. Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings / M. Giraldo et al. // World Conference on Timber Engineering “Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2012”. Auckland, 2012. pp. 1–8.
18. Experimental and numerical study of fire spread on a wooden facade fire / B. Lafdal et al. // 4th International Symposium on Fire Safety of Facades – FSF 2024. Lund (Sweden), France. pp. 177–188.
19. СП 131.13330.2020. Строительная климатология : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. № 859/пр и введен в действие с 25 июня 2021 г. : введен взамен СП 131.13330.2018 : дата введения 2021-06-25 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 15.07.2024).
20. Пузач, С. В., Лучкин, С. А., Гомозов, А. В. Анализ теплового воздействия на окна лестничной клетки пожара, возникшего на балконе жилого здания // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 5. С. 16–25. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2024.33.05.16-25>.

REFERENCES

1. SPP 2.13130.2020. Fire protection systems. Provision of fire resistance of protection objects : set of rules : approved and put into effect by the order of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia) from March 12, 2020 № 151 // introduced to replace SP 2.13130.2012 : date of introduction 2020-09-12 // Codex : electronic fund of legal and normative.-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248963> (date of application: 15.07.2024).
2. SPP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits : set of rules : approved and introduced by the order of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia) from March 19, 2020 № 194 : introduced to replace SP 1.13130.2009 : date of introduction 2020-09-19 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248961> (date of application: 15.07.2024).
3. On approval of the methodology for determining the estimated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of different classes of functional fire hazard : Order of the Ministry

of Emergency Situations of Russia from November 14, 2022 № 1140 // Codex : electronic fund of legal and regulatory-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300260998?marker=6540IN> (date of application: 15.07.2024).

4. Approbation and analysis of regulatory requirements for the protection of stairwells with open openings in case of fire propagation along the facade / A. V. Pekhotikov et al. // Fire and explosion safety. 2024. T. 33, № 1. C. 5–14. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2024.33.01.5-14>.

5. Analysis of the influence of the fire resistance factor of building structures on the safety of people in case of fire / A. V. Pekhotikov et al. // Pozharovzryvozasnost. 2022. T. 33, № 3. C. 49–62.

6. Estimation of the possibility of rescuing people at a fire in a residential building / A. B. Pekhotikov et al. // Fire safety. 2021. № 3 (104). C. 86–97.

7. Analysis of technical solutions for fire protection of ordinary stairwells in the reconstruction of sectional residential buildings / A. V. Pekhotikov et al. // Pozharovzryvozasnost. 2023. T. 32, № 2. pp. 59–70. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2023.32.02.59-70>.

8. Shebeko Y. N., Shebeko A. Y., Gordienko D. M. Estimation of the equivalent fire duration for building structures based on modeling of fire in the room // Fire Safety. 2015. № 1. C. 31–39.

9. Evacuation and behavior of people at fires : a textbook / V. V. Kholshchevnikov et al. M. : Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2015. 262 p.

10. Analysis of mathematical models of the development of fire hazards in the system of buildings and structures / A. S. Yarosh et al. // Bulletin of the scientific center for safety of work in the coal industry. 2019. № 1. pp. 50–56.

11. A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires / D. Cortés et al. // Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (1). pp. 1–18. DOI: <https://10.3390/app10165609>.

12. Launder, B. E., Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. № 3 (2). pp. 269–289. DOI: [https://10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://10.1016/0045-7825(74)90029-2).

13. Hossain M. S., Rodi W. A turbulence model for buoyant flows and its application for vertical buoyant jets // Turbulent Buoyant Jets and Plums (Rodi W. ed.). HMT Series: Oxford, England. 1982. Vol. 6. pp. 121–172.

14. Lockwood, F. C., Shah, N. G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Proceedings of the Simposium (International) on Combustion. 1981. № 18 (1). pp. 1405–1414. DOI: [https://10.1016/S0082-0784\(81\)80144-0](https://10.1016/S0082-0784(81)80144-0).

15. Bressloff, N. W., Moss, J. B., Rubini, P. A. Assessment of a differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation as applied in the discrete transfer radiation model. Numerical heat transfer, Part B // An International Journal of Computation and Methodology. 1996. № 29 (3). pp. 381–397. DOI: <https://10.1080/10407799608914988>.

16. Truelove J. S. The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1984. №. 27 (3). pp. 464–466. DOI: [https://10.1016/0017-9310\(84\)90294-1](https://10.1016/0017-9310(84)90294-1).

17. Computer-simulation research on building-facade geometry for fire spread control in buildings with wood claddings / M. Giraldo et al. // World Conference on Timber Engineering “Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2012”. Auckland, 2012. pp. 1–8.

18. Experimental and numerical study of fire spread on a wooden facade fire / B. Lafdal et al. // 4th International Symposium on Fire Safety of Facades – FSF 2024. Lund (Sweden), France. pp. 177–188.

19. SP 131.13330.2020. Construction climatology : set of rules : approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from December 24, 2020 № 859/pr and put into effect from June 25, 2021. : introduced to replace SP 131.13330.2018 : date of introduction 2021-06-25 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (date of application: 15.07.2024).

20. Puzach, C. V., Luchkin, S. A., Gomofov, A. V. Analysis of the thermal impact on the windows of the stairwell of the fire that occurred on the balcony of a residential building // Fire and explosion safety. 2024. Т. 33, № 5. pp. 16–25. DOI: <https://10.22227/0869-7493.2024.33.05.16-25>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карпов Алексей Васильевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, 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

Лучкин Сергей Алексеевич, научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12); РИНЦ ID: 760855; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

Гомозов Александр Васильевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12); РИНЦ ID: 760879; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Karpov, Cand. Sci. (Eng.), leading research fellow, Federal State Budgetary Institution VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); RSCI ID: 338983; Scopus Author ID: 56097627000; Researcher ID: L-7707-2015; ORCID: 0000-0002-0187-3159; e-mail: avkhome@inbox.ru

Sergey A. Luchkin, research fellow, Federal State Budgetary Institution VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); RSCI ID: 760855; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

Aleksander V. Gomofov, Cand. Sci. (Eng.), leading research fellow, Federal State Budgetary Institution VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); RSCI ID: 760879; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2025
Одобрено после рецензирования 05.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 614.841.2

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ СУДОВОГО КАБЕЛЯ ПРИ СВЕРХТОКАХ

Мокряк Андрей Юрьевич, Сысоева Татьяна Павловна, Мокряк Анна Васильевна
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема пожарной опасности судовых кабелей, возникающей при воздействии на них сверхтоков. В результате серии натурных экспериментов по моделированию протекания токов от 40 до 480 А с шагом 30 А в кабеле марки СПОВ 3×1,5 были получены данные о характере термической деструкции его изоляции и визуальных проявлениях этого процесса. Эксперименты выполнялись на электротехническом стенде. Было уделено внимание пожароопасным процессам тепловыделения в судовом кабеле при протекании токов выше длительно допустимых. Проанализированы явления, которые, в зависимости от токов нагрузки, могут приводить к возникновению, развитию и распространению пожара. На основании экспериментальных данных были построены аппроксимирующие трендовые линии зависимости времени появления визуальных признаков дыма, карбонизации изоляции, горения изоляции от протекающего тока. Посредством видеосъемки на скриншотах в статье продемонстрирован процесс деструкции изоляции при протекании сверхтоков по кабелю СПОВ 3×1,5. Результаты экспериментальных исследований могут быть применены в рамках проведения экспертиз по делам, связанным с пожарами на судах. В частности, они могут быть использованы для анализа электротехнической версии возникновения возгорания на судне. Кроме того, результаты исследования могут оказаться полезными при проектировании и эксплуатации судовых электроустановок, что позволит минимизировать риски возникновения пожароопасной ситуации.

Ключевые слова: судовой кабель СПОВ, сверхток, изоляция из радиационно-модифицированного полиэтилена в оболочке из поливинилхлоридного пластика, термическая деструкция, пожарная опасность, источник зажигания

Для цитирования: Мокряк А. Ю., Сысоева Т. П., Мокряк А. В. Пожарная опасность судового кабеля при сверхтоках // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 23–36.

FIRE HAZARD OF SHIP CABLES DURING OVERCURRENTS

Andrey Yu. Mokryak, Tatiana P. Sysoeva, Anna V. Mokryak
St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of the fire hazard of ship cables that occurs when they are exposed to overcurrents. Thus, as a result of a series of field experiments on modeling the flow of currents from 40 to 480 A with increments in 30 A in the cable of the SPOV 3×1,5 brand, data are obtained on the nature of thermal degradation of its insulation and visual

manifestations of this process. The experiments are performed on an electrical engineering stand. Attention is paid to fire-hazardous processes of heat generation in a ship cable when currents exceeding long-term permissible values are flowing. The phenomena that, depending on the load currents, can lead to the occurrence, development and spread of fire are analyzed. Based on the experimental data, approximating trend lines of dependence of the time of appearance of visual signs of smoke, carbonation of insulation, insulation burning, on the flowing current are constructed. The article demonstrates the process of insulation destruction during overcurrent flow through the SPOV 3×1,5 cable using video footage and screenshots. The results of the experimental studies can be used in the context of conducting expert examinations of the cases related to fires on ships. In particular, they can be used to analyze the electrical version of the fire on the ship. In addition, the results of the study can be useful in the design and operation of ship electrical installations, which will minimize the risks of fires.

Keywords: SPOV ship cable, overcurrent, radiation-modified polyethylene insulation in a polyvinyl chloride plastic shell, thermal destruction, fire hazard, ignition source

For Citation: Mokryak A. Yu., Sysoeva T. P., Mokryak A. V. Fire hazard of ship cable at overcurrents // Technospheric Safety. 2025. № 1 (46). pp. 23–36.

Введение

В настоящее время в РФ наблюдается активное развитие судостроительной отрасли, охватывающей как морской и речной флот, так и береговые и плавучие сооружения. Это обусловлено как военно-политической ситуацией, учитывая значительную протяженность береговой линии РФ, составляющую 60 985 км [1, 2], так и необходимостью развития танкерного флота.

Залогом успешной эксплуатации флота является обеспечение его пожарной безопасности [3, 4]. Исправные судовые электрические системы являются критически важным элементом функционирования и надежности морских судов, где каждый компонент должен соответствовать строгим требованиям к устойчивости в условиях агрессивной морской среды. Особое внимание в последние годы уделяется проблеме пожарной опасности, связанной с эксплуатацией судовых кабелей [5, 6], поскольку их отказ может привести к катастрофическим последствиям, включая человеческие жертвы, экологический ущерб и значительные материальные потери. В связи с этим кабели марки СПОВ, широко применяемые в судостроении благодаря их огнестойким и маслозащищенным характеристикам, требуют детального изучения в условиях аварийных режимов, таких как, например, протекание сверхтоков.

Актуальность исследования обусловлена тем, что сверхтоки, возникающие вследствие коротких замыканий, перегрузок или неисправностей оборудования, становятся одной из ключевых причин перегрева кабелей, деградации изоляции и последующего возгорания [7–9]. Несмотря на заявленную огнестойкость СПОВ, их поведение при длительном воздействии токов, превышающих номинальные значения, остается недостаточно изученным. Существующие нормативные документы и стандарты ре-

Актуальность исследования обусловлена тем, что сверхтоки, возникающие вследствие коротких замыканий, перегрузок или неисправностей оборудования, становятся одной из ключевых причин перегрева кабелей, деградации изоляции и последующего возгорания [7–9]. Несмотря на заявленную огнестойкость СПОВ, их поведение при длительном воздействии токов, превышающих номинальные значения, остается недостаточно изученным. Существующие нормативные документы и стандарты ре-

гламентируют общие параметры пожарной безопасности, однако специфика тепловых процессов в кабелях СПОВ при аварийных режимах требует дополнительного экспериментального и аналитического исследования [10].

Кроме того, рост мощности судового электрооборудования и увеличение плотности прокладки кабельных трасс повышают риски локальных перегревов, что усиливает необходимость прогнозирования критических сценариев. Отсутствие систематических данных о температурной динамике, времени до воспламенения изоляции и условиях распространения пламени ограничивает возможность разработки эффективных превентивных мер.

Целью работы является оценка пожарной опасности судового кабеля марки СПОВ при протекании по нему токов, превышающих длительно допустимые значения, с точки зрения термической деградации изоляционных материалов и формирования условий

для возгорания. Проведенное исследование вносит вклад в решение актуальной задачи предотвращения аварийных ситуаций в целях устойчивого развития международных стандартов морской индустрии.

Методика проведения эксперимента

Проведение эксперимента осуществлялось на электротехническом стенде, сконструированном на базе Исследовательского центра экспертизы пожаров [11]. Конструктивно электротехнический стенд состоит из основной рабочей камеры со стальным корпусом и прозрачным жаропрочным стеклом в створке для визуального наблюдения за ходом эксперимента, а также трансформатором, блоком балластных резисторов, блоком регистрации тока и панели коммутации (рис. 1). Система вентиляция служит для оперативного удаления газообразных продуктов сгорания после проведения эксперимента с каждым образцом.

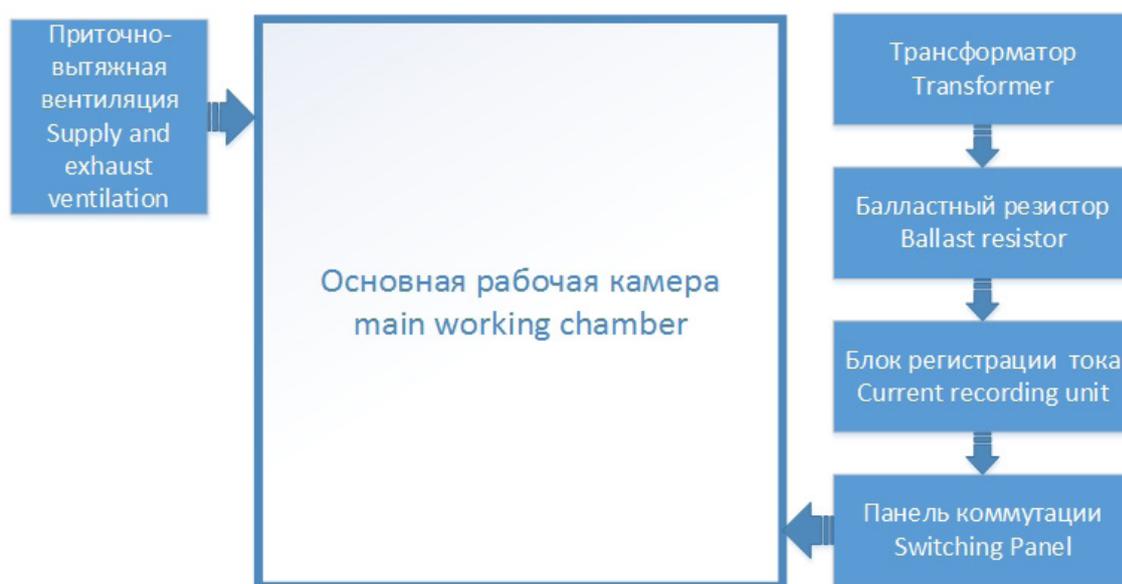


Рис. 1. Структурная схема электротехнического стенда для экспериментального моделирования протекания сверхтоков по проводникам

Fig. 1. Block diagram of an electrical engineering stand for experimental modeling the flow of overcurrents through conductors

В качестве объекта исследования в работе был выбран трехжильный кабель марки СПОВ 3×1,5 (рис. 2). Кабель предназначен для универсального применения в силовых цепях, цепях управления и сигнализации при переменном напряжении до 690 В частотой тока до 400 Гц или при постоянном напряжении до 1 000 В на судах морского флота неограниченного района плавания, речного флота, береговых и плавучих сооружениях.

Кабели марки СПОВ предназначены для эксплуатации при температуре окружа-

ющей среды от –50 до +65 °С. В их конструкции содержатся медные многопроволочные жилы с изоляцией из радиационно-модифицированного полиэтилена в оболочке из поливинилхлоридного пластика.

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 3.

Электротехнический стенд позволяет, в частности, моделировать протекание по токоведущим проводникам токов до 1 000 А [11]. Геометрические размеры электрического стенда дают возможность поместить в него проводник длиной не более 0,6 м. Исходя из этого

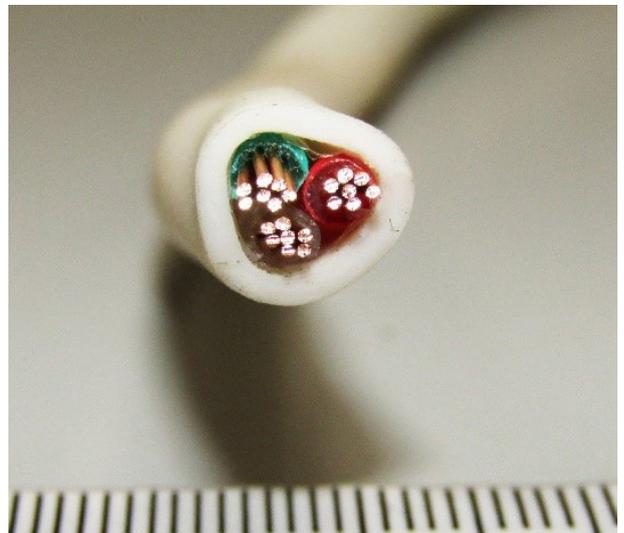
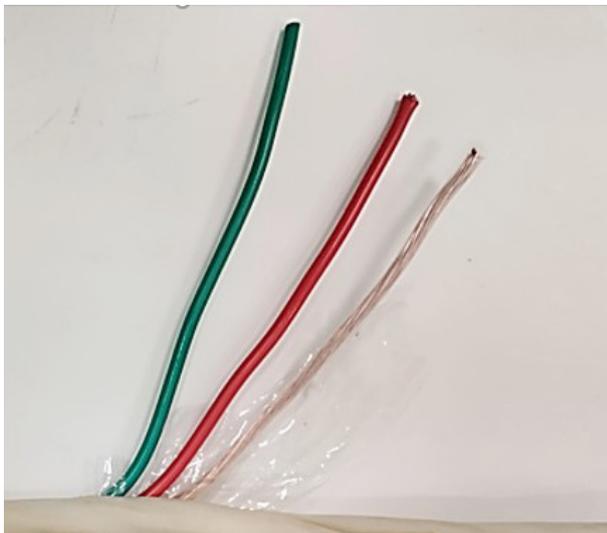


Рис. 2. Кабель СПОВ 3×1,5: а — токоведущие жилы кабеля; б — вид с торца в разрезе

Fig. 2. Cable SPOV 3×1,5: a — current-carrying cores of the cable; b — cross-section view from the end

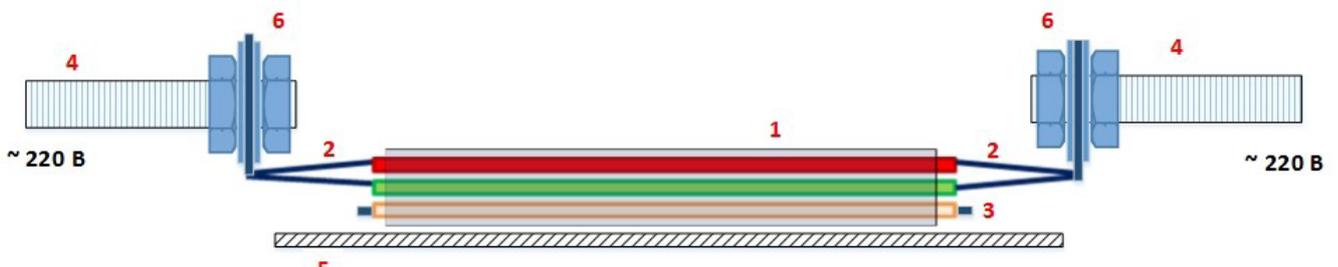


Рис. 3. Схема подключения образца кабеля СПОВ к электропитанию в электротехническом стенде:

- 1 — внешняя изоляция кабеля; 2 — скрученные жилы кабеля, подключенные к электропитанию;
- 3 — жила кабеля, не подключенная к электропитанию; 4 — скрученные медные многопроволочные проводники, на которые осуществлялась подача электропитания; 5 — асбестовая подложка; 6 — болтовые контакты;
- 7 — латунная шпилька диаметром 8 мм с резьбой

Fig. 3. Wiring diagram of the SPOV cable sample to the power supply in the electrical engineering stand:

- 1 — external cable insulation; 2 — twisted cable cores connected to the power supply;
- 3 — cable core not connected to the power supply; 4 — twisted copper multi-wire conductors that were supplied with power; 5 — asbestos substrate; 6 — bolt contacts; 7 — 8 mm diameter brass stud with thread

ограничения были подготовлены образцы длиной примерно 0,6 м. С обоих концов образцов кабеля снимался верхний слой изоляции длиной около 5 см, а также была удалена изоляция жил красного и зеленого цвета длиной около 2 см. Зачищенные от изоляции участки жил соединяли друг с другом методом холодной скрутки. Третья жила с прозрачной изоляцией в электрическую цепь не подключалась. Кабель в нижней части имел провис, поддерживаемый снизу асбестовой подложкой.

Для определения характера термической деструкции изоляции электропроводов при протекании по ним сверхтока на 16 образцов кабеля СПОВ 3×1,5 подвали следующие токи: 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 480 А. Согласно ТУ 16-505.301-81 «Кабели судовые с изоляцией из облученного полиэтилена», длительно допустимый ток кабеля СПОВ 3×1,5 — 16,7 А. Указанные значения токов соответствуют примерной кратности сверхтоков от 2 до 16 крат и охватывают возможный диапазон их появления при токовой перегрузке или коротком замыкании в электрооборудовании.

Подготовленный образец кабеля фиксировался оголенными скрученными концами через болтовые контактные соединения в рабочей камере электротехнического

стенда (рис. 3). Снизу кабель поддерживался асбестовой подложкой. На образец подавался переменный ток напряжением 220 В частотой 50 Гц.

Длительность воздействия тока составляла 30 мин. Эксперимент прекращался раньше отведенного времени в случае разделения кабеля на части (если таковое имело место) посредством нагрева выше температуры плавления меди на локальном участке при протекании сверхтока.

В ходе эксперимента осуществлялась видеосъемка процесса, фиксирующая признаки термической деструкции изоляции, а именно появление дыма, видимой карбонизации наружной изоляции кабеля и пламенного горения. Также фиксировалось время их появления.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных экспериментов отражены на рис. 4 и в таблице. Так, на рис. 4 продемонстрированы скриншоты видеозаписи, выполненные на различных временных отрезках экспериментов.

Результаты эксперимента приведены в таблице, где описаны процессы термической деструкции изоляции кабеля СПОВ, которые наблюдались в ходе эксперимента.



40, 50, 60 А, 26 мин



90 А, 26 мин



120 А, 25 мин



150 А, 10 мин



180 А, 4 мин



210 А, 1 мин 11 с



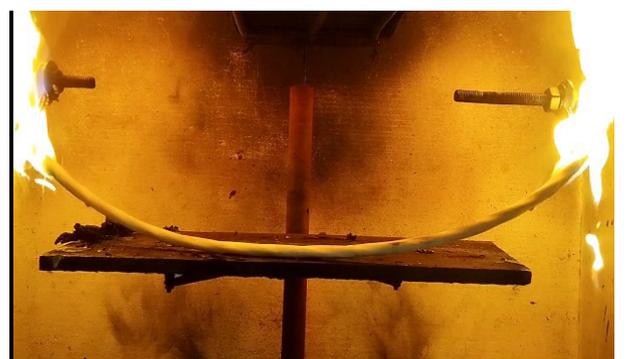
240 А, 2 мин 42 с



270 А, 33 с



300 А, 1 мин 20 с



330 А, 5 с 360 А, 9 с

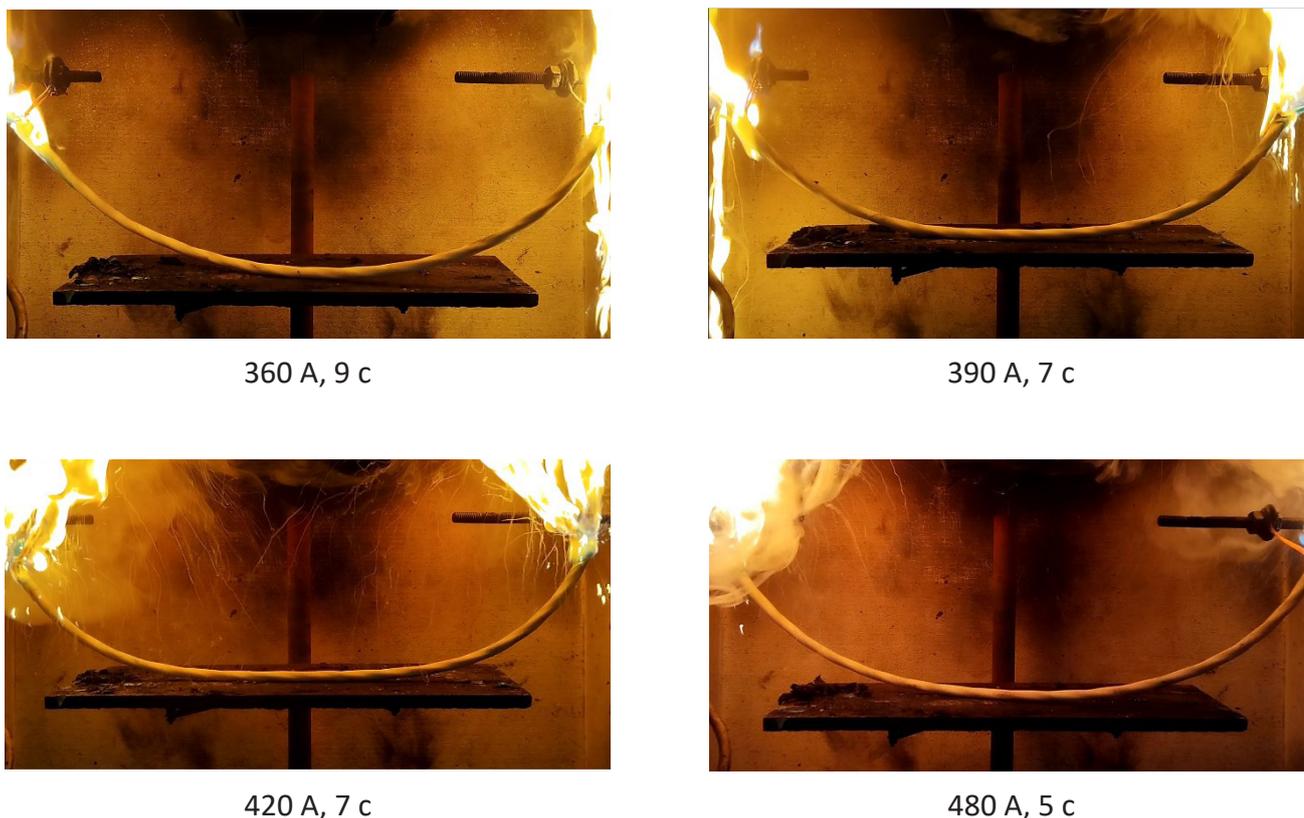


Рис. 4. Термическая деструкция изоляции кабеля СПОВ 3×1,5 при протекании по нему различных сверхтоков. Указано время от момента начала подачи
 Fig. 4. Thermal destruction of the insulation of the SPOV 3×1,5 cable when various overcurrents flow through it. The time from the start of submission is indicated

Таблица
Визуально наблюдаемые термические поражения изоляции
кабеля СПОВ 3×1,5 при протекании сверхтоков
Table
Visually observed thermal damage to the insulation
of the SPOV 3×1,5 cable during overcurrent

Ток, А Current, A	Описание характера термических поражений изоляции The description of the nature of thermal damage to insulation
40, 50, 60	визуально признаков термических поражений изоляции не наблюдается visually, there are no signs of thermal damage to the insulation
90	дымовыделение слабое, карбонизация изоляции не наблюдается smoke emission is weak, carbonation of insulation is not observed
120, 150, 180	дымовыделение сильное, карбонизация изоляции по всей длине кабеля strong smoke generation, carbonation of insulation along the entire length of the cable

Продолжение таблицы

Ток, А Current, A	<p style="text-align: center;">Описание характера термических поражений изоляции The description of the nature of thermal damage to insulation</p>
210	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на концевом оголенном участке кабеля, на этом же участке наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 3 мин 5 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation is burning at the end of the exposed section of the cable, dripping fragments of burning insulation are observed in the same section, after 3 min. 5 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction</p>
240	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на концевом оголенном участке кабеля, на этом же участке наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 2 мин прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation is burning at the end of the exposed section of the cable, dripping fragments of burning insulation are observed in the same section, after 2 min. the flame burning stops, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame propagation in the horizontal direction</p>
270	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на концевом оголенном участке кабеля, на этом же участке наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 2 мин 30 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation is burning at the end of the exposed section of the cable, dripping fragments of burning insulation are observed in the same section, after 2 min. 30 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction</p>
300	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 3 мин 30 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation burns in two exposed sections of the cable with a larger area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same sections, after 3 min. 30 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction</p>
330	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 2 мин 10 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation burns in two exposed sections of the cable with a larger distribution area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same sections, after 2 min. 10 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction</p>
360	<p>дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 2 мин. прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении smoke generation is strong, insulation burning in two exposed sections of the cable with a larger area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same area, after 2 minutes the flame burning stops, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction</p>

Окончание таблицы

Ток, А Current, A	Описание характера термических поражений изоляции The description of the nature of thermal damage to insulation
390	дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 1 мин 55 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation burns in two exposed sections of the cable with a larger area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same sections, after 1 min. 55 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction
420	дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 1 мин 50 с прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении the smoke emission is strong, the insulation burns in two exposed sections of the cable with a larger area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same sections, after 1 min. 50 sec. cessation of flame burning, there is no flame burning on the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction
480	дымовыделение сильное, горение изоляции на двух оголенных участках кабеля с большей площадью распространения (по сравнению с предыдущими экспериментами), на этих же участках наблюдаются капающие фрагменты горячей изоляции, через 1 мин прекращение пламенного горения, на центральной части кабеля пламенное горение отсутствует, отсутствует распространение пламени в горизонтальном направлении smoke generation is strong, insulation burning in two exposed sections of the cable with a larger area (compared to previous experiments), dripping fragments of burning insulation are observed in the same sections, after 1 min. there is no flame burning in the central part of the cable, there is no flame spreading in the horizontal direction

Анализируя визуальные наблюдения в ходе экспериментов по протеканию сверхтоков в кабеле СПОВ 3×1,5, можно сделать следующие выводы относительно характера термической деструкции его изоляции и явлений, которые сопровождали этот процесс.

При токах 40, 50, 90 А отсутствуют признаки термической деструкции изоляции, а также отсутствует ее пламенное горение.

При токах 120, 150, 180 А происходят карбонизация и плавление изоляции, в то же самое время ее пламенное горение отсутствует.

При токах 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 480 А возникает пламенное горение изоляции электропроводов только в ме-

стах их присоединения к питающим контактам, при этом происходит падение капель горячей изоляции. Следует отметить, что при этих токах практически отсутствует распространение пламени по изоляции в горизонтальном направлении.

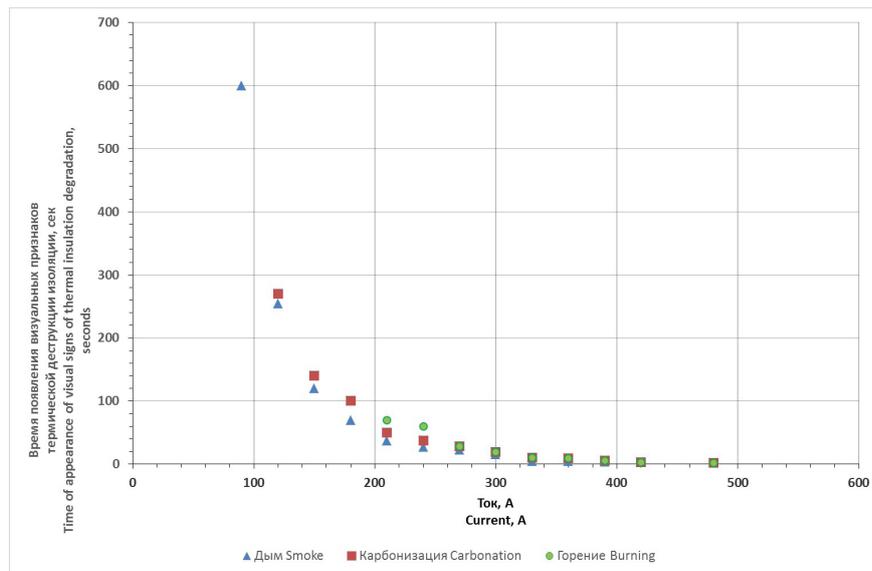
Нагрев жил токами 120, 150, 180, 210, 240, 270 А вызывает постепенную карбонизацию изоляции, что может привести к неполному короткому замыканию, которое ограничивает ток, требуемый для срабатывания автоматических выключателей. Подобная ситуация опасна с точки зрения возникновения, развития и распространения пожара.

Полученные экспериментальные данные, зафиксированные при видеосъемке,

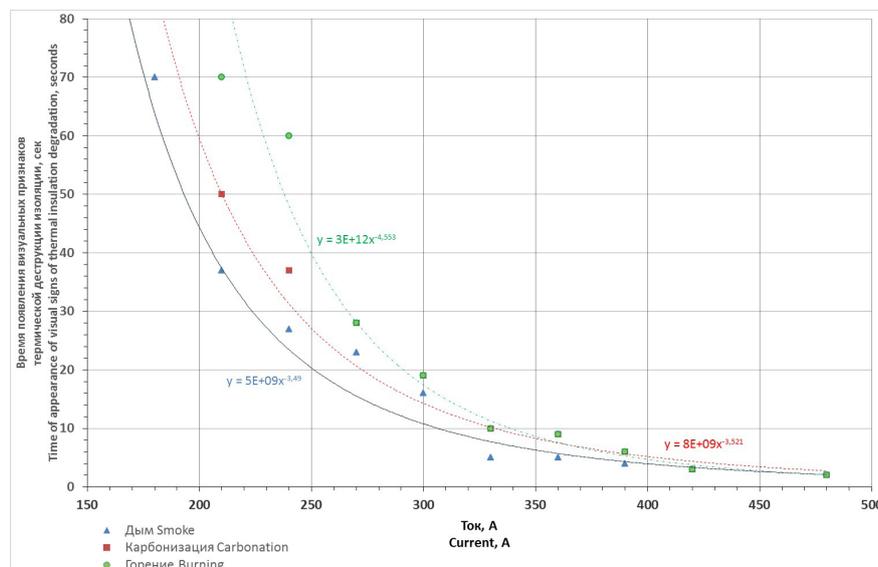
дают основание предполагать, что наибольшая пожарная опасность при протекании сверхтоков по судовому кабелю СПОВ возникает на оголенных участках кабеля, например в зоне контактных соединений. Провоцирующим фактором также может выступать локальный разогрев при переходных сопротивлениях в зоне контакта. Пожарная опасность кабеля СПОВ 3×1,5

может проявляться при токах свыше 210 А вследствие разлета фрагментов горячей полимерной изоляции. Также установлено, что в горизонтальном положении кабеля СПОВ не происходит заметного распространения горения изоляции.

На графике (рис. 5) показаны зависимости времени появления визуальных признаков термической деструкции изоляции от тока.



а



б

Рис. 5. Зависимость времени появления визуальных признаков термической деструкции изоляции от тока: а — полный график; б — участок графика и трендовые линии степенной аппроксимации

Fig. 5. Dependence of the time of appearance of visual signs of thermal insulation degradation on current: а — full plot; б — plot section and power-law approximation trend lines

Ниже приведены степенные аппроксимирующие линии тренда зависимости времени появления различных явлений, зафиксированных в эксперименте, от протекающего тока.

Полученные аппроксимации могут быть использованы при анализе обстоятельств в ходе производства пожарно-технической экспертизы.

Дым:

$$y = 4\,759\,009\,906,2x^{3,5}. \quad (1)$$

Карбонизация изоляции:

$$y = 7\,516\,652\,343,9x^{3,5}. \quad (2)$$

Горение изоляции:

$$y = 3\,304\,791\,920\,910,4x^{4,6}. \quad (3)$$

Заключение

В результате проведенных экспериментов выполнена оценка пожарной опасности кабеля СПОВ 3×1,5 в зависимости от воздействовавших на него сверхтоков.

Прохождение тока через токоведущие жилы в диапазоне от 120 до 270 А вызывает карбонизацию изоляции. Этот процесс способен спровоцировать как возникновение токов утечки, так и аварийный режим неполного короткого замыкания. Возникающий при этом ток, который ограничен сопротивлением карбонизированного слоя, может оказаться недостаточным для выполнения основной функции автоматических выключателей, а именно защитного отключения электрической цепи от коротких замыканий и перегрузок. Подобная ситуация может

привести как к пожару, так и возникновению очагов горения.

Пожарная опасность при протекании сверхтоков по судовому кабелю СПОВ 3×1,5 возникает, в частности, при токах от 210 до 480 А в зоне контактных соединений и обусловлена, во-первых, пламенным горением изоляции, а во-вторых, разлетом ее горящих фрагментов.

Несмотря на то что кабель в условиях эксперимента не поддерживает распространение горения, по крайней мере в горизонтальном положении, его пожарная опасность проявляется на оголенных участках, где есть доступ к изоляции токоведущих жил, которая, в свою очередь, проявляет горючие свойства.

Приведены экспериментальные установленные зависимости времени появления ви-

зуальных признаков термической деструкции изоляции (появление дыма, карбонизация изоляции и ее горение) от тока.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении экспертиз по делам

о пожарах на судах, в частности для анализа электротехникой версии причины возгорания, а также для проектирования и эксплуатации судовых электроустановок с целью минимизации рисков возникновения пожаров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моря, омывающие территорию России // Национальный Атлас России : сайт. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/244.html> (дата обращения: 29.01.2025).
2. Филатов Н. Н. Озера России — диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях : отчет о НИР № 17-17-00037. Российский научный фонд. 2018.
3. Еськин Н. В., Кочетов В. Д. Анализ деятельности общественных организаций, осуществляющих деятельность в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах // Проблемы и пути совершенствования проведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций : сб. тр. XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. Химки, 2024. С. 53–59.
4. Ayçi T., Barlas B., Ölçer A. Fire safety analysis onboard passenger ships by using fire dynamics simulations: case study of a turkish domestic passenger ship // Journal of ETA Maritime Science. 2024. № 12 (2). pp. 224–236.
5. Мокряк А. В. Основные причины пожаров и взрывов на морских судах // Modern Science. 2022. № 1–2. С. 395–397.
6. Bogalecka M. Fires as a cause of ship accidents — a statistical approach // Bezpieczenstwo i Technika Pożarnicza. 2015. Т. 37, № 1. pp. 171–180.
7. Сыроева Т. П., Кухарев А. А., Калач А. В. Комплексная методика исследования металлов и сплавов с целью установления условий и причин пожаров на маломерных судах // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 2 (54). С. 116–125.
8. Долголенко В. Т., Ермолин Ю. Г., Пискунов С. М. Современные судовые кабели // Кабели и провода. 2021. № 4 (390). С. 25–31.
9. Burkov A. F., Mikhanoshin V. V., Van Ha N. Investigation of the qualitative characteristics of marine cable products // Russian Electrical Engineering. 2024. Т. 95, № 7. pp. 569–573.
10. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : КАБЕЛЬ, 2009. 328 с.
11. Смелков Г. И., Чешко И. Д., Плотников В. Г. Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2017. № 3. С. 121–128.

REFERENCES

1. Seas washing the territory of Russia // National Atlas of Russia : website. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/244.html> (date of application: 29.01.2025).

2. Filatov N. N. Lakes of Russia — diagnosis and forecast of ecosystems state under climatic and anthropogenic impacts : research Report № 17-17-00037. Russian Science Foundation. 2018.
3. Yeskin N. V., Kochetov V. D. Analysis of the activity of public organizations engaged in the protection of population and territories from emergencies, fire safety and safety of people on water bodies // Problems and ways to improve emergency rescue work in the elimination of emergency situations : proceedings of the XXXIII Intern. scientific-practical conf. Khimki, 2024. pp. 53–59.
4. Ayçi T., Barlas B., Ölçer A. Fire safety analysis onboard passenger ships by using fire dynamics simulations: case study of a turkish domestic passenger ship // Journal of ETA Maritime Science. 2024. № 12 (2). pp. 224–236.
5. Mokryak A. V. Main causes of fires and explosions on board the sea-going ships // Modern Science. 2022. № 1–2. С. 395–397.
6. Bogalecka M. Fires as a cause of ship accidents — a statistical approach // Bezpieczenstwo i Technika Pożarnicza. 2015. T. 37, № 1. pp. 171–180.
7. Sysoeva T. P., Kukharev A. A., Kalach A. V. Complex methodology of metals and alloys research in order to establish the conditions and causes of fires on small vessels // Problems of risk management in technosphere. 2020. № 2 (54). pp. 116–125.
8. Dolgolenko V. T., Ermolin Yu. G., Piskunov S. M. Modern ship cables // Cables and wires. 2021. № 4 (390). pp. 25–31.
9. Burkov A. F., Mikhanoshin V. V., Van Ha N. Investigation of the qualitative characteristics of marine cable products // Russian Electrical Engineering. 2024. T. 95, № 7. pp. 569–573.
10. Smelkov G. I. Fire safety of electrical wiring. M. : CABLE, 2009. 328 p.
11. Smelkov G. I., Cheshko I. D., Plotnikov V. G. Experimental modeling of fire hazardous emergency modes in electrical wires // Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2017. № 3. pp. 121–128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мокряк Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, начальник отдела экспертизы пожаров и организации подготовки экспертов исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149); SPIN-код: 2339-7366; AuthorID: 817195; e-mail: mokand7@mail.ru

Сысоева Татьяна Павловна, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149); РИНЦ ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; Researcher ID: AAE-9733-2022; ORCID: 0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Мокряк Анна Васильевна, научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149); SPIN-код: 8987-0146; Author ID: 984582; e-mail: mokryakanna@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey Y. Mokryak, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Fire Expertise and Organization of Expert Training at the Research Center for Fire Expertise St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 2339-7366; Author ID: 817195; e-mail: mokand7@mail.ru

Tatyana P. Sysoeva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Research Fellow at the Research Center for Fire Expertise St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); RSCI ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; Researcher ID: AAE-9733-2022; ORCID: 0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Anna V. Mokryak is a research fellow at the Research Center for Fire Expertise St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 8987-0146; Author ID: 984582; e-mail: mokryakanna@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.2025
Одобрено после рецензирования 19.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 614.835

ОЦЕНКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ И НЕАДИАБАТИЧНОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Никишов Дмитрий Сергеевич, Хафизов Ильдар Фанилевич, Спыну Евгений Андреевич,
Колесник Артём Александрович

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Ежегодно в нашей стране случаются промышленные и бытовые взрывы газов. Только в 2024 г. до данным МЧС России произошло 32 подобных происшествия. Актуальность представленного в статье исследования заключается в том, что взрывы внутри помещений являются серьезной угрозой как для здоровья и жизни людей, находящихся внутри, так и для окружающей среды, а также причиной значительных материальных потерь. В связи с этим оценка избыточного давления взрыва является важной задачей для обеспечения безопасности и разработки соответствующих мер предотвращения и защиты.

Один из важных факторов, влияющих на силу взрыва, — степень герметичности помещения. Проведенное исследование позволяет оценить, насколько негерметичность влияет на избыточное давление взрыва, и разработать рекомендации по созданию более безопасных условий внутри помещений. Это имеет большое значение для промышленных предприятий, где риск взрывов является особенно высоким, а также для разработки нормативных документов и строительных норм.

В статье рассчитано избыточное давление взрыва по двум существующим методикам. Методика, которая рекомендована в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, является основной при оценке рисков на производстве. Посредством расчета давления взрыва для аналогичных условий через тротиловый эквивалент было определено, что давление взрыва по рекомендованной методике значительно меньше возможного значения. Такая разница возникает из-за неточного определения коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. В результате было определено оптимальное значение этого коэффициента. Проведенное исследование может быть использовано при оценке возможных последствий взрывов с целью повышения надежности и безопасности промышленных объектов.

Ключевые слова: взрыв, избыточное давление взрыва, безопасность, коэффициент негерметичности помещения, горение, риск, утечки, промышленные объекты, газы, степень разрушения

Для цитирования: Оценка избыточного давления взрыва с учетом коэффициента негерметичности помещения и неадиабатичности процесса горения / Д. С. Никишов [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 37–51.

ESTIMATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE TAKING INTO ACCOUNT THE PREMISES LEAKAGE COEFFICIENT AND NON-ADIABATICITY OF THE COMBUSTION PROCESS

Dmitry S. Nikishov, Ildar F. Khafizov, Evgeny A. Spynu, Artyom A. Kolesnik
Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

Abstract. Every year, industrial and domestic gas explosions occur in our country. Only in 2024, according to the Russian Emergencies Ministry, 32 such incidents occurred. The relevance of the research presented in the article is that explosions inside buildings are a serious threat to both the health and lives of people inside and to the environment, as well as the cause of significant material losses. Therefore, estimating the excess pressure of an explosion is an important task for ensuring safety and developing appropriate prevention and protection measures.

One of the important factors influencing the force of the explosion is the degree of tightness of the premises. The conducted research makes it possible to estimate the extent to which leakage affects the excess pressure of an explosion, and to work out recommendations for creating safer conditions inside premises. This is of great importance for industrial enterprises, where the risk of explosions is especially high, as well as for the development of regulatory documents and building codes.

The article calculates the excess explosion pressure using two existing methods. The method recommended in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009 is the main risk factor in production. By calculating the explosion pressure for similar conditions using the TNT equivalent, it was determined that the explosion pressure according to the recommended method is significantly less than the possible value. This difference occurs due to the inaccurate determination of the coefficient taking into account the leakage of the premises and the non-adiabatic nature of the combustion process. As a result, the optimal value of this coefficient was determined. The conducted research be used to estimate the possible consequences of explosions in order to improve the reliability and safety of industrial facilities.

Keywords: explosion, explosion overpressure, safety, leakage coefficient of the premises, combustion, risk, leakage, industrial facilities, gases, degree of destruction

For Citation. Estimation of the explosion overpressure taking into account the coefficient of room leakage and nonadiabaticity of the combustion process / D. S. Nikishov et al. // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 37–51.

Введение

Существует несколько методов оценки избыточного давления взрыва, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Одним из основных методов яв-

ляется метод численного моделирования, который позволяет учитывать множество факторов, таких как характеристики взрывчатого вещества, геометрия помещения, условия окружающей среды и др. Для численного моделирования используются раз-

личные программные комплексы, такие как TOXI+Risk 5, FLACS, CFD и др., которые основаны на решении уравнений гидродинамики и теплопередачи.

Однако, несмотря на преимущества метода численного моделирования, его использование требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Кроме того, для правильной оценки избыточного давления необходимо иметь достоверные данные о характеристиках взрывчатого вещества, его концентрации в помещении, а также о других параметрах. В некоторых случаях они могут быть недоступны или неполны, что может привести к неточным результатам [1].

Еще одним методом оценки избыточного давления взрыва является метод эмпирических формул, основанный на экспериментальных данных, полученных путем проведения взрывных испытаний. По их результатам разрабатываются формулы, позволяющие оценить избыточное давление взрыва в зависимости от различных факторов, таких как мощность взрыва, расстояние до источника взрыва, характеристики помещения и др.

Однако использование эмпирических формул имеет свои ограничения. Во-первых, такие формулы могут быть разработаны только для определенного класса взрывов и условий, и их применение для других случаев может быть неправильным. Во-вторых, экспериментальные данные могут быть недостаточно точными или неполными, что также может привести к неточным результатам. Кроме того, эмпирические формулы не учитывают влияние таких факторов, как геометрия помещения, условия окружающей среды и др., что способно существенно влиять на избыточное давление взрыва.

В настоящее время многие авторы занимаются исследованиями избыточного давления взрыва. В научной статье Тетерина И. А. и Сулименко В. А. «Влияние загроможденности на избыточное давление взрыва паров сжиженного природного газа» [1] было выявлено, что увеличение процентного содержания пропан-бутана в смеси метан/пропан/бутан/воздух приводит к линейному увеличению максимального избыточного давления взрыва при наличии преград. Однако обозначенное исследование давления взрыва проводится без учета влияния коэффициента негерметичности помещения (K_H).

Также исследованиями в указанной области занимались Горев В. А. и Корольченко А. Д. в научной статье «Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении» [2]. Авторами было выявлено влияние на конечный результат отдельных факторов, таких как объем помещения; давление, при котором легкосбрасываемая конструкция начинает движение; масса и глубина установки легкосбрасываемой конструкции в проеме; периметр проема и скорость взрывного горения. Проведенное исследование подробно описывает влияние избыточного давления на материалы и конструкции, но также не учитывает влияние K_H помещения.

Методология

Первый этап — определение целей и задач исследования. Так, основной целью настоящей статьи является оценка избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H .

Вторым этапом методологии исследования является анализ предметной области. Для оценивания избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H необхо-

димо изучить основные принципы взрывной безопасности, особенности поведения взрывных волн в помещении, а также рассмотреть существующие методы и модели, позволяющие достичь поставленной цели. Таким образом получится сформировать полное представление о предмете исследования и выбрать наиболее подходящую математическую модель.

На третьем этапе выбирается математическая модель для оценки избыточного давления взрыва, позволяющая учесть основные физические процессы, происходящие во время взрыва, такие как сжатие газа, расширение взрывной волны и взаимодействие с преградами в помещении. Кроме того, в модель должен быть включен K_H , который учитывает возможные утечки газа из помещения и влияние на избыточное давление.

Таким образом, методология исследования для оценки избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H содержит определение целей и задач исследования, анализ предметной области и выбор математической модели. Каждый этап требует тщательной проработки и учета всех факторов, влияющих на оценку избыточного давления. Такой подход позволит получить

достоверные результаты и сделать важные выводы по вопросам взрывной безопасности в помещении.

В соответствии с СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» K_H — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, — допускается принимать равным трем независимо от наличия или отсутствия аварийной вентиляции и других параметров.

Таким образом, поставленный вопрос является не до конца решенным. Уточнение значения K_H может значительно повлиять на общую оценку взрывопожаробезопасности помещения.

Результаты

Для обозначения степени влияния K_H на величину избыточного давления взрыва необходимо определить избыточное давление взрыва по аналогичным методикам, которые не учитывают K_H .

Определим для примера давление взрыва метана в помещении размером 15×15×5 м.

Определим полный объем помещения V :

$$V = 15 \cdot 15 \cdot 5 = 1125 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Определим массу воздуха M_g в помещении:

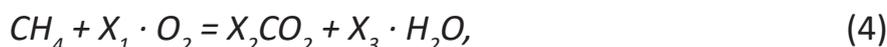
$$M_g = \rho \cdot V = 1,3 \cdot 1125 = 1462,5 \text{ кг}, \quad (2)$$

где ρ — плотность воздуха, равная 1,3 кг/м³.

Тогда масса кислорода M_k в помещении (с учетом содержания кислорода в воздухе 23 %) будет равна:

$$M_k = 0,23 \cdot M_g = 0,23 \cdot 1462,5 = 336,38 \text{ кг.} \quad (3)$$

Запишем уравнение реакции окисления метана:



где X_1, X_2, X_3 , — неизвестные коэффициента.

Баланс углерода $C:1 = X_2$.

Баланс водорода $H:4 = 2 \cdot X_3$, тогда $X_3 = 2$.

Баланс кислорода $O:2 \cdot X_1 = 2 \cdot X_2 + X_3$, тогда $X_1 = X_2 + X_3/2$.

Подставим X_2 и X_3 в $X_1 = X_2 + X_3/2$, получим $X_1 = 2$.

Тогда уравнение реакции окисления с коэффициентами будет выглядеть:



Относительные молекулярные массы атомов найдем в периодической системе химических элементов:

$$\mu(H) = 1; \mu(C) = 12; \mu(O) = 12. \quad (6)$$

Относительные массы молекул:

$$\mu(CH_4) = 16; \mu(O_2) = 32. \quad (7)$$

Пусть X — массовое соотношение кислорода/метана в реакции окисления:

$$X = \frac{2 \cdot \mu(O_2)}{\mu(CH_4)} = \frac{2 \cdot 32}{16} = 4. \quad (8)$$

Определим массу метана:

$$M_{\Gamma} = \frac{M_k}{X} = \frac{336,38}{4} = 84,1 \text{ кг.} \quad (9)$$

Определим количество энергии при окислении найденной массы метана (теплота сгорания метана $q_m = 44$ мДж/кг):

$$E = q_m \cdot M_{\Gamma} = 44 \cdot 84,1 = 3700,4 \text{ мДж.} \quad (10)$$

Определим массу тротила, которая будет выделять такое же количество энергии (энергия взрыва тротила $q_m = 4,5$ мДж/кг):

$$M_T \cdot q_T = E; M_T = \frac{E}{q_T} = \frac{3700,4}{4,5} = 822,3 \text{ кг} \quad (11)$$

Найдем избыточное давление при взрыве тротила массой 822,3 кг.

$$\Delta p = p - p_0, \quad (12)$$

где p — давление на фронте ударной волны;

p_0 — атмосферное давление (101 кПа).

Определим приведенный радиус зоны взрыва по формуле:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2 \cdot K \cdot M \cdot T_9}}, \quad (13)$$

где R — расстояние от центра взрыва, м;

M — масса заряда, кг;

K — коэффициент, который учитывает характер подстилающей поверхности. Для металла он равен 1,0; для бетона — 0,95; для дерева — 0,8; для грунта — 0,6;

T_9 — тротильный эквивалент взрывчатого вещества.

Определим давление взрыва, при этом в зависимости от найденного значения \bar{R} используются две разные формулы. Для значений $\bar{R} \leq 6,2$ необходимо пользоваться следующей формулой:

$$\Delta p = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)^{-1}, \text{ кПа}. \quad (14)$$

Для значений $\bar{R} > 6,2$ формула имеет следующий вид:

$$\Delta p = \frac{70}{\bar{R}} \left(\sqrt{\lg \bar{R} - 0,322} \right)^{-1}, \text{ кПа}. \quad (15)$$

Определим приведенный радиус зоны взрыва:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2 \cdot K \cdot M \cdot T_9}} = \frac{1}{\sqrt[3]{2 \cdot 0,95 \cdot 822,3 \cdot 1}} = 0,09. \quad (16)$$

Поскольку $\bar{R} \leq 6,2$, то для расчета воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta p = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)^{-1} = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + 0,09^3} - 1 \right)^{-1} = 6,41 \text{ мПа}. \quad (17)$$

Как видно, избыточное давление взрыва составит 6,41 мПа при взрыве метана массой 84,1 кг.

Проведем расчет по общепринятой методике, которая изложена в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009 для условий из предыдущего расчета.

Найдем коэффициент β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания по следующей формуле:

$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}, \quad (18)$$

где n_C, n_H, n_O, n_X — число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего;



$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} = 1 + \frac{4 - 0}{4} - 0 = 2. \quad (20)$$

Найдем C_{cm} — стехиометрическую концентрацию метана по формуле:

$$C_{CT} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 2} = 9,36 \%. \quad (21)$$

Определим плотность метана при расчетной температуре t_p , кг/м³ по следующей формуле:

$$\rho_{\Gamma} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{16,04}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 61)} = 0,585 \text{ кг/м}^3, \quad (22)$$

где M — молярная масса, кг/кмоль;

V_0 — молярный объем, равный 22,413 м³/кмоль;

t_p — расчетная температура, °С.

В методике указано: если не удастся определить расчетную температуру, то следует принять ее равной 61 °С.

Свободный объем — это объем помещения минус объем пространства, занятого технологическим оборудованием. Допускается принимать $V_{ce} = 0,8 \cdot V_{пом}$, если неизвестен объем пространства, занятого технологическим оборудованием.

Избыточное давление взрыва ΔP определяется по следующей формуле:

$$\Delta P = (P_{max} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z \cdot 100}{V_{CB} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot C_{СТХ} \cdot K_H}, \quad (23)$$

где P_{max} — максимальное давление взрыва стехиометрической смеси, если определить невозможно, допускается принимать $P_{max} = 900$ кПа;

P_0 — начальное давление, кПа, допускается принимать $P_0 = 101$ кПа;

m — масса горючего газа, кг;

Z — коэффициент участия горючего во взрыве, является справочной величиной, для метана равен $Z = 0,5$.

V_{CB} — свободный объем помещения, м³;

K_H — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, допускается принимать $K_H = 3$.

Подставив все необходимые значения, определим избыточное давление взрыва:

$$\Delta P = (900 - 101) \cdot \frac{84,1 \cdot 0,5 \cdot 100}{1125 \cdot 0,8 \cdot 0,585 \cdot 9,36 \cdot 3} = 227 \text{ кПа}. \quad (24)$$

Таким образом, расчет по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, показывает, что при взрыве метана массой 84,1 кг избыточное давление взрыва составит 0,23 МПа.

Проведем расчет для таких же условий, но изменяя K_H (табл. 1).

На рис. 1 представлено влияние K_H на избыточное давление взрыва. На рис. 2 отмечены зоны поражения, рассчитанные по первой методике. На рис. 3 обозначены зоны поражения при расчете по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009. Сравнение рис. 2 и рис. 3 представлено в табл. 2.

Таблица 1
Изменение K_H для взрыва 84,1 кг метана

Table 1
Change in the leakage coefficient for an explosion of 84,1 kg of methane

Номер расчета Calculation number	Значение K_H Value of leakage coefficient	Избыточное давление взрыва, МПа Explosion overpressure, MPa
1	5,0	0,136
2	4,0	0,170
3	3,0	0,227
4	2,0	0,341
5	1,0	0,682
6	0,5	1,364
7	0,4	1,704
8	0,3	2,273
9	0,2	3,409
10	0,1	6,818

Окончание таблицы 1

Номер расчета Calculation number	Значение K_n Value of leakage coefficient	Избыточное давление взрыва, МПа Explosion overpressure, MPa
11	0,09	7,575
12	0,08	8,522
13	0,07	9,740
14	0,06	11,363
15	0,05	13,635

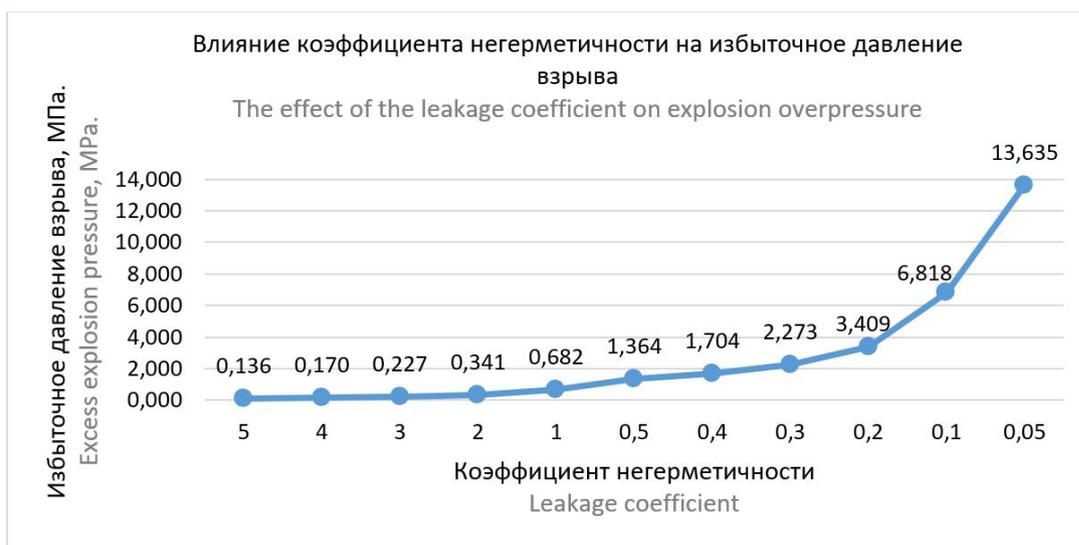


Рис. 1. Влияние K_n на избыточное давление взрыва
Fig.1. The effect of the leakage coefficient on the explosion overpressure

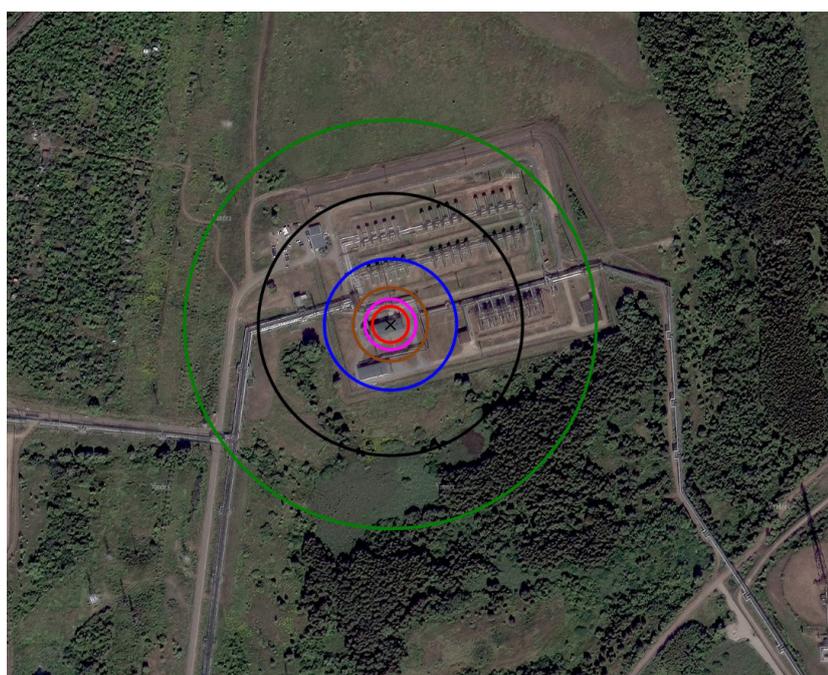


Рис. 2. Зоны поражения, рассчитанные по первой методике
Fig. 2. Affected areas calculated using the first method



Рис. 3. Зоны поражения, рассчитанные по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009
 Fig. 3. Affected areas calculated using the method described in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009

Таблица 2
Сравнение зон поражения, рассчитанных по первой методике и по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009

Table 2
 Comparison of the affected areas calculated using the first method and the method described in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009

Степень повреждения Degree of damage	Избыточное давление P, кПа Overpressure P, kPa	Радиус зоны, определенный по первой методике, м Radius of the area, determined by the first method, m	Радиус зоны, определенный по методике НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, м Radius of the area, determined by the method NPB 105-03 and SP 12.13130.2009, m
Полное разрушение зданий Total destruction of buildings	100	20,4	10,1
50 %-е разрушение зданий 50 % destruction of buildings	53	28,6	14,2
Средние повреждения зданий Average damage to buildings	28	41,7	20,7

Окончание таблицы 2

Степень повреждения Degree of damage	Избыточное давление Р, кПа Overpressure P, kPa	Радиус зоны, определенный по первой методике, м Radius of the area, determined by the first method, m	Радиус зоны, опре- деленный по ме- тодике НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, м Radius of the area, determined by the method NPB 105-03 and SP 12.13130.2009, m
Умеренные поврежде- ния зданий (поврежде- ние внутренних пере- городок, рам, дверей и т. п.) Moderate damage to buildings (damage to internal partitions, frames, doors, etc.)	12	74,3	36,8
Нижний порог повреж- дения человека волной давления The lower threshold of damage to a person by a pressure wave	5	148,4	73,5
Малые повреждения (разбита часть остекления) Minor damage (part of the glass is broken)	3	231,2	114,5

Таким образом, проведенный расчет показывает, что по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, давление взрыва может быть занижено более чем в 30 раз. Все параметры в методике являются расчетными и не могут быть подвергнуты изменениям, кроме K_H помещения. Итоговое давление взрыва начинает соотноситься при уменьшении K_H до значения 0,1.

На рис. 2 и 3 видно, что зоны поражения, рассчитанные по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, уменьшаются примерно в 2 раза. Таким образом, существующая методика оценки занижает возможные последствия при взрывах.

Обсуждение

В статье проведено сравнение двух существующих методик оценки избыточного давления взрыва. Несмотря на то, что в последние годы многие исследования нацелены на повышение безопасности объектов при взрывах, исследований в области определения давления взрыва практически нет.

В работе определено, что существующий метод оценки избыточного давления значительно занижает реальные результаты. Такое упущение может привести к серьезным последствиям, выраженным в человеческих жертвах и недооценивании степени возможных разрушений при авариях.

На рис. 1 видно, что при значении коэффициента от 5 до 1 происходит незначительное изменение избыточного давления. Поэтому, исходя из предыдущих расчетов и рис. 1, необходимо пересмотреть значение K_n . Его значение при оценке избыточного давления должно быть в пределах от 0,5 до 0,1. Так, при средней степени его влияния на избыточное давление значение находится именно в этом диапазоне. Расчет, в котором был оценен тротильный эквивалент взрыва, подтверждает необходимость использования значения K_n именно в этом диапазоне. Обозначенная тема требует еще более подробного исследования для уточнения значения K_n , чтобы более точно можно было проводить оценку избыточного давления взрыва.

Выводы

В статье показана несовершенство методики, которая рекомендована в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009. Было определено влияние коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, а также оптимальное его значение, которое следует принимать в расчетах. Благодаря исследованию можно более точно определить параметры взрыва, что, в свою очередь, позволяет подобрать оптимальные методы защиты оборудова-

ния и зданий, а также определить безопасное расстояние от эпицентра взрыва.

Необходимо продолжать исследования для более точного определения коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения.

При проведении дальнейших исследований важно использовать математические модели, которые учитывают не только величину избыточного давления, но и динамику его изменения во времени исходя из воздействия негерметичности. Это позволяет более точно предсказать последствия взрыва и спроектировать эффективные меры по предотвращению аварий.

Применение современных программных комплексов для моделирования взрывных процессов позволяет аналитикам увидеть, как различные параметры, включая K_n , влияют на давление и разрушение. Такие исследования становятся основой для разработки рекомендаций по проектированию безопасных установок и организации рабочего пространства.

В заключение следует сказать, что изучение избыточного давления взрыва с учетом K_n является актуальной задачей для повышения безопасности на производстве. Это исследование требует комплексного подхода, включающего математическое моделирование и анализ, что обеспечивает более глубокое понимание процессов, происходящих в условиях взрыва.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тетерин И. А., Сулименко В. А. Влияние загроможденности на избыточное давление взрыва паров сжиженного природного газа // VIII Международная научно-практическая конфе-

ренция, посвященная Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». 2024. С. 314–319.

2. Горев В. А., Корольченко А. Д. Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 3. С. 12–23.

3. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении / А. А. Комаров [и др.] // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 132–140.

4. Буюкевич А. Л. Определение расчетного избыточного давления взрыва в помещениях с обращением горючих пылей // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2015. Т. 10, № 1. С. 56–61.

5. Голиков А. В., Субботин Д. И., Куранов Д. В. Оценка достоверности расчетных моделей несущего каркаса трубчатых печей // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 3. С. 18–33.

6. Исаев А. А. Особенности применения информационно-экспертных систем в анализе пожарной опасности бинарных жидкостей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. Т. 2, № 1 (5). С. 212–215.

7. Колесников Е. Ю. Неопределенность оценок взрывоопасности на примере текстильных производств // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 11. С. 23–29.

8. Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса образования взрывоопасной метановоздушной смеси в помещениях / А. А. Комаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24, № 4. С. 30–38.

9. Овчинникова Л. А., Назымов Е. В. Пожарная безопасность помещений хранения и технического обслуживания газобалонных автомобилей // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса. 2018. С. 172–176.

10. Стасева Е. В., Курьята Р. В., Панькова А. В. Анализ и оценка промышленной безопасности объекта газоснабжения — газораспределительная станция // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону — Новомихайловский, 7–11 сентября 2020 г. 2020. Т. 22. С. 285.

11. Шульга Т. Э., Никулина Ю. В. Категорирование помещений по взрывопожарной и пожарной опасности на основе онтологического моделирования // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56. С. 112–118.

REFERENCES

1. Teterin I. A., Sulimenko V. A. Influence of clogging on overpressure of liquefied natural gas vapor explosion // VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Day of Civil Defense “Civil Defense at the Guard of Peace and Security”. 2024. pp. 314–319.

2. Gorev V. A., Korolchenko A. D. Influence of the light-loaded structures on the overpressure during an explosion in the room // Pozharovzryvozasnost. 2022. T. 31, № 3. pp. 12–23.

3. Modeling of emergency emissions of explosive substances in the room / A. A. Komarov et al. // Vestnik MSCU. 2014. № 10. pp. 132–140.

4. Buyakevich, A. L. Determination of the calculated overpressure of the explosion in the premises with the handling of combustible dusts // *Emergency situations: education and science*. 2015. Т. 10, № 1. pp. 56–61.
5. Golikov A. V., Subbotin D. I., Kuranov D. V. Assessment of the reliability of calculation models of the load-bearing frame of tubular furnaces // *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020. № 3. pp. 18–33.
6. Isaev A. A. Features of the application of information and expert systems in the analysis of fire hazard of binary liquids // *Fire safety: problems and prospects*. 2014. Т. 2, № 1 (5). pp. 212–215.
7. Kolesnikov E. Yu. Uncertainty of explosion hazard estimates on the example of textile production // *Labor Safety in Industry*. 2017. № 11. pp. 23–29.
8. Experimental study and numerical modeling of the process of explosive methane-air mixture formation in the premises / A. A. Komarov et al. // *Pozharovzryvozasnost*. 2015. Т. 24, № 4. pp. 30–38.
9. Ovchinnikova L. A., Nazymov E. V. Fire safety of storage and maintenance facilities of gas-powered cars // *Actual problems of agroindustrial complex*. 2018. pp. 172–176.
10. Staseva E. V., Kuryata R. V., Pankova A. V. Analysis and assessment of industrial safety of gas supply object — gas distribution station // *Technosphere safety, reliability, quality, energy and resource saving : proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don — Novomikhailovskiy, September 7–11, 2020*. 2020. Т. 22. P. 285.
11. Shulga T. E., Nikulina Y. V. Categorization of premises by explosion and fire hazard on the basis of ontological modeling // *Izvestiya St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2021. № 56. pp. 112–118.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никишов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); ResearcherID: rid101099; ORCID: 0009-0005-6007-2633; e-mail: nikishov_2018@mail.ru

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Спыну Евгений Андреевич, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: pkrb@mail.ru

Колесник Артём Александрович, старший преподаватель кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 862655; e-mail: pkrb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry S. Nikishov, postgraduate student of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); ResearcherID: rid101099; ORCID: 0009-0005-6007-2633; e-mail: nikishov_2018@mail.ru

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Evgeny A. Spynu, postgraduate student of the Department of Fire and Industrial Safety Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: pkpb@mail.ru

Artem A. Kolesnik, Senior Lecturer, Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 862655; e-mail: pkpb@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025
Одобрено после рецензирования 14.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 614.841.45

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕСЕЙ АНТИПИРЕНОВ ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ

Колесова Виктория Юрьевна¹, Мельников Никита Олегович^{1,2}, Монахов Антон Андреевич¹, Головина Екатерина Валерьевна³

¹ Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В. А. Кучеренко, г. Москва, Российская Федерация

³ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема снижения пожарной опасности древесины. Применяемые сегодня огнезащитные средства базируются в большинстве своем на известных и давно применяемых антипиренах с варьируемым соотношением. При этом механизмы их действия и кинетические параметры термического разложения пропитанной древесины полностью не изучены, особенно при применении смесевых антипиренов. Методами термического анализа исследовано влияние смеси антипиренов диаммонийфосфата и карбамида на термическое разложение пропитанной древесины в зависимости от содержания химических веществ определены кинетические параметры и огнезащитная эффективность по ГОСТ 30028.3–2022. Исследован механизм совместного действия антипиренов. Получены зависимости энергии активации основной стадии термического разложения пропитанной древесины. Установлено, что энергия активации возрастает с увеличением общего поглощения исследуемых антипиренов. Показано, что огнезащитная эффективность при определенном соотношении одних и тех же антипиренов может взаимно усиливаться. Показана возможность снижения сырьевой себестоимости средств огнезащиты древесины с сохранением высокой эффективности.

Ключевые слова: антипирен, огнезащитная эффективность, огнезащита древесины, термический анализ, кинетические параметры термического разложения

Для цитирования: Оценка эффективности смесей антипиренов для огнезащиты древесины / В. Ю. Колесова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 52–66.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF FLAME RETARDANT MIXTURES FOR WOOD FIRE PROTECTION

Viktoriya Y. Kolesova¹, Nikita O. Melnikov^{1,2}, Anton A. Monakhov¹, Ekaterina V. Golovina³

¹ Russian Chemical-Technological University named after D. I. Mendeleev, Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko, Moscow, Russian Federation

³ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of reducing the fire hazard of wood. The flame retardants used today are mostly based on well-known and long-used flame retardants with

a variable ratio. At the same time, the mechanisms of their action and the kinetic parameters of thermal decomposition of impregnated wood have not been fully studied, especially when using blended flame retardants. The effect of a mixture of flame retardants diammonium phosphate and carbamide on the thermal decomposition of impregnated wood, depending on the content of chemicals, was investigated by thermal analysis methods, kinetic parameters and fire-retardant effectiveness were determined according to GOST 30028.3-2022. The mechanism of joint action of flame retardants is investigated. The dependences of the activation energy of the main stage of thermal decomposition of impregnated wood are obtained. It was found that the activation energy increases with an increase in the total absorption of the flame retardants studied. It has been shown that the flame-retardant effectiveness can be mutually enhanced with a certain ratio of the same flame retardants. The possibility of reducing the raw material cost of wood fire protection products while maintaining high efficiency is shown.

Keywords: flame retardant, fire-retardant efficiency, fire protection of wood, thermal analysis, kinetic parameters

For Citation: Evaluation of the effectiveness of flame retardant mixtures for wood fire protection / V. Yu. Kolesova et al. // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 52–66.

Введение

Задачи огнезащиты материалов и конструкций из древесины появились в глубокой древности и остаются нерешенными и по сей день. Это вызвано сохраняющимися большими объемами применения древесины в качестве как конструктивного, так и отделочного материала. Кроме того, в настоящее время появляются новые виды древесных материалов, набирающих большую популярность в строительстве, такие как брус многослойный клееный из шпона (далее — LVL), древесина перекрестноклееная (далее — CLT), брус многослойный клееный и др., и огнезащита их требует дополнительных исследований и разработки новых технических решений.

Несмотря на огромный выбор различных средств огнезащиты, представленных сегодня к применению, все они базируются на давно известных классических антипиренах. Исследованию механизмов их дей-

ствия, огнезащитной эффективности, а также термическому анализу обработанной древесины и огнестойкости строительных конструкций посвящено много научных трудов [1–6], но при этом еще остаются неизученными многие аспекты. Например, сохраняются противоречия между мнениями исследователей, основанными на роли физических факторов в огнезащите, и данными по эффективности антипиренов, полученными экспериментально.

Наиболее актуальными задачами сегодня является повышение эффективности, снижение расходов (поглощений) и себестоимости средств огнезащиты древесины. Поэтому научно-обоснованный подход к разработке рецептур и изысканию новых антипиренов является обязательным для достижения требуемого результата. Зачастую повысить эффективность огнезащитных средств позволяет оптимизация рецептуры и правильная комбинация выбранных антипиренов. Например, известно, что

борная кислота и бура обладают слабыми огнезащитными свойствами и что они нетехнологичны для применения, но при их совместном использовании наблюдается ярко выраженный синергетический эффект, т. е. взаимное усиление свойств, что нашло отражение в создании, широком применении на практике и стандартизации огнебиозащитного препарата ББ-11 [7].

Ранее в работах [8, 9] методами дифференциально-термического анализа (далее — ДТА) и огнезащитной эффективности изучены зависимости разложения древесины, пропитанной антипиренами, а именно диаммонийфосфатом, полифосфатом аммония, карбамидом и карбонатом калия, нашедшими наибольшее применение на практике при производстве водных пропиточных защитных средств, а также определены кинетические параметры основной стадии интенсивного терморазложения.

Настоящая работа посвящена изучению огнезащитной эффективности и анализу термоокислительного разложения (далее — термическое разложение) древесины, пропитанной смесью антипиренов диаммонийфосфата и карбамида при различных соотношениях и поглощениях.

Материалы и методы

Объектами исследования являются следующие антипирены и их смеси:

- диаммонийфосфат $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ по ГОСТ 8515–75 [10];
- карбамид $\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2$ по ГОСТ 2081–2010 [11];
- диаммонийфосфат и карбамид в соотношении 1:1;
- диаммонийфосфат и карбамид в соотношении 1:2;

- диаммонийфосфат и карбамид в соотношении 2:1.

Исследования проводились на образцах воздушно-сухой древесины заболони сосны с влажностью 6–8 % и средней плотностью 450 кг/м^3 размером $15 \times 15 \times 6 \text{ мм}$ (последний размер — по длине волокон). Растворы антипиренов заданной концентрации готовили разведением в воде соответствующего количества веществ. Пропитку образцов осуществляли по методу «вакуум-атмосферное давление» при условиях, позволяющих проводить сквозную пропитку [12]. Таким образом, после окончательной сушки антипирены были равномерно распределены по всему объему древесины.

Огнезащитная эффективность антипиренов, а именно зависимость потери массы при огневом испытании от общего поглощения, обеспечивалась в соответствии с ГОСТ 30028.3–2022 [12]. Общее поглощение — это масса сухих веществ антипиренов, введенных в древесину при пропитке, отнесенная к ее объему.

Для исследования термического разложения образцов древесины использовался ДТА, проводимый на дериватографе Q-1500 d системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey.

Условия проведения эксперимента:

- нагрев — $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$;
- скорость нагрева — $10 \text{ }^\circ\text{C/мин}$;
- атмосфера — воздух;
- навеска (измельченная древесина) — 100 мг ;
- тигли — платина;
- образец сравнения — Al_2O_3 .

Расчет кинетических параметров, характеризующих процесс терморазложения, проводился на основе данных ДТА. Для этого использовалась линеаризация температурной зависимости по закону Аррениуса:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k e^{-\frac{E_a}{RT}} f(\alpha), \quad (1)$$

где α — степень превращения;

T — температура, К;

k — предэкспоненциальный множитель;

E_a — энергия активации;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К);

$f(\alpha)$ — функция, определяющая механизм разложения.

В качестве функции $f(\alpha)$ использовалось уравнение химической реакции первого порядка:

$$f(\alpha) = 1 - \alpha. \quad (2)$$

Уравнение (1) при реакции первого порядка в логарифмическом виде представляется как:

$$\ln \frac{(d\alpha/d\tau)}{(1 - \alpha)} = \ln k - \frac{E_a}{RT}. \quad (3)$$

Расчет проводился по данным кривых TG и DTG в зависимости от температуры T . Степень превращения α в i -й точке вычислялась по формуле (4), а значения скорости превращения приравнивались к отклонениям кривой DTG от базовой линии анализируемого пика:

$$\alpha_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta m}. \quad (4)$$

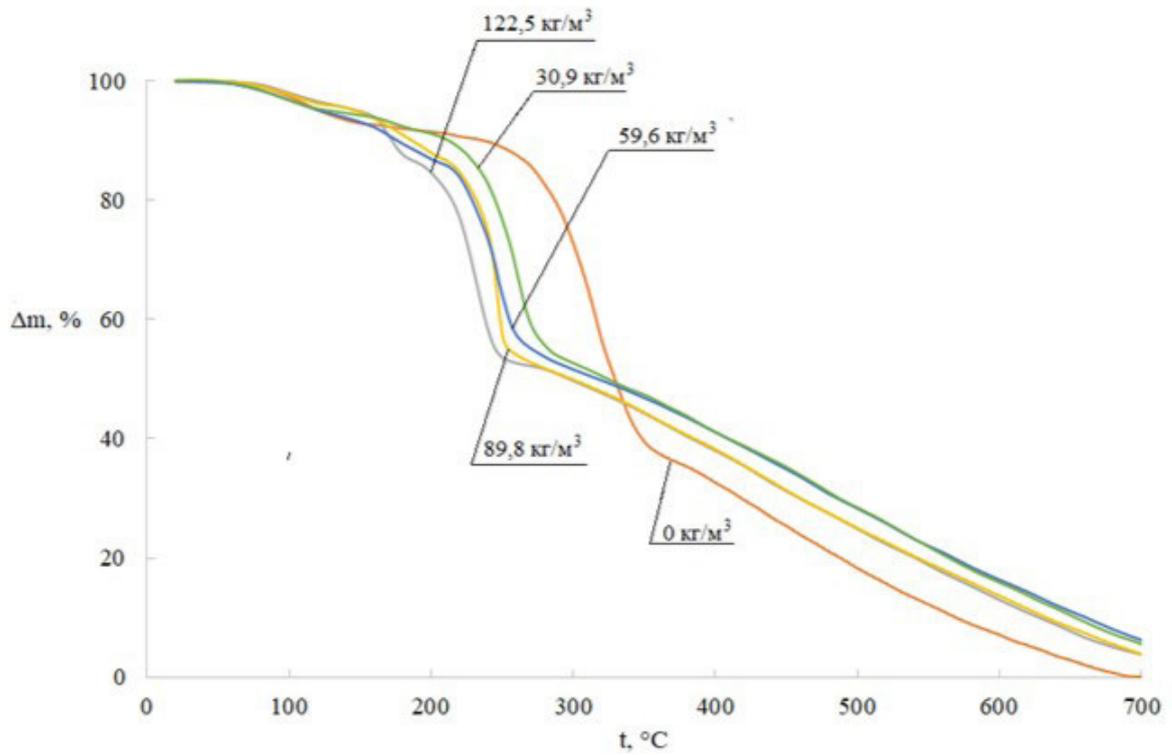
Результаты и их обсуждение

Методом ДТА получены термоаналитические кривые как исходной древесины, так и образцов, пропитанных смесями исследуемых антипиренов с различными общими поглощениями.

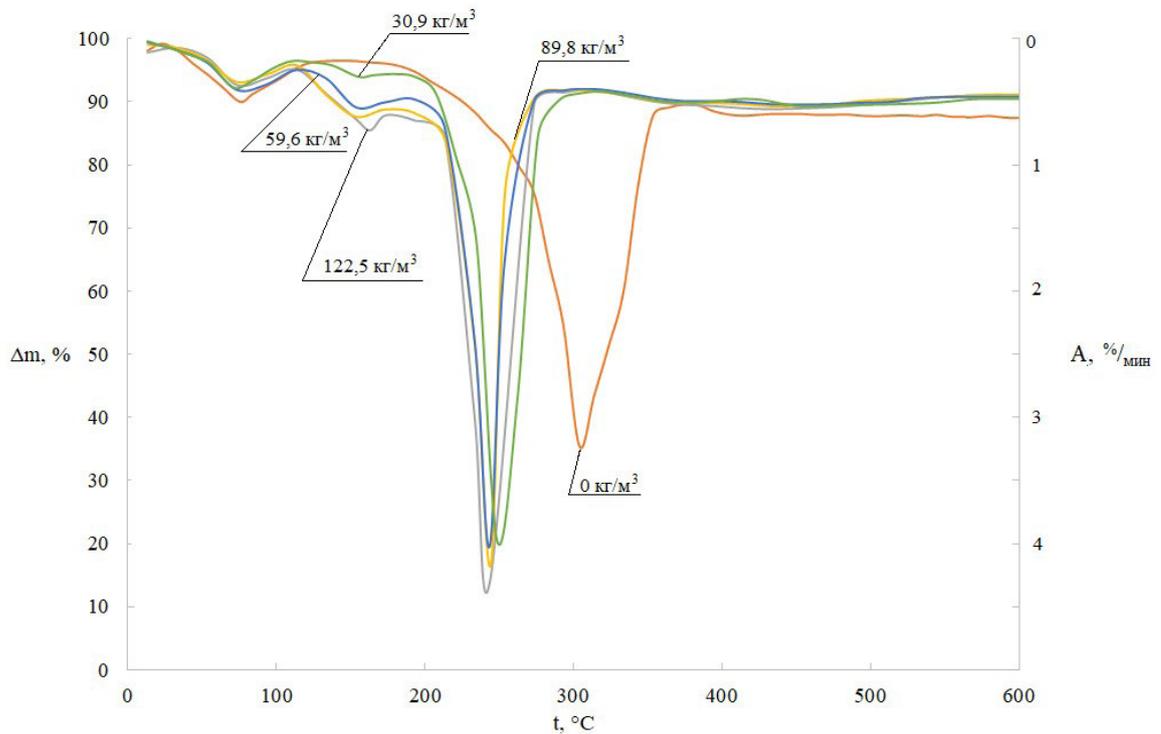
На рис. 1–3 представлены совмещенные полученные кривые TG (уменьшение массы от температуры) и DTG (скорость уменьшения массы от температуры) исходной древесины и образцов, пропитанных смесями диаммонийфосфата и карбамида в соотношениях 1:1, 1:2 и 2:1.

Разложение исходной древесины (на графиках обозначено «0 кг/м³») характеризуется тремя основными стадиями. На первом этапе при температуре до 120 °С происходит потеря приблизительно 10 % массы, связанная с выделением содержащейся влаги в образце. Далее в интервале 180–360 °С наблюдается основная стадия интенсивного термического разложения древесины с потерей массы около 60 %. На третьей стадии происходит догорание углистого остатка с полной потерей массы при 700 °С.

Для образцов, пропитанных антипиренами (на графиках обозначены соответству-



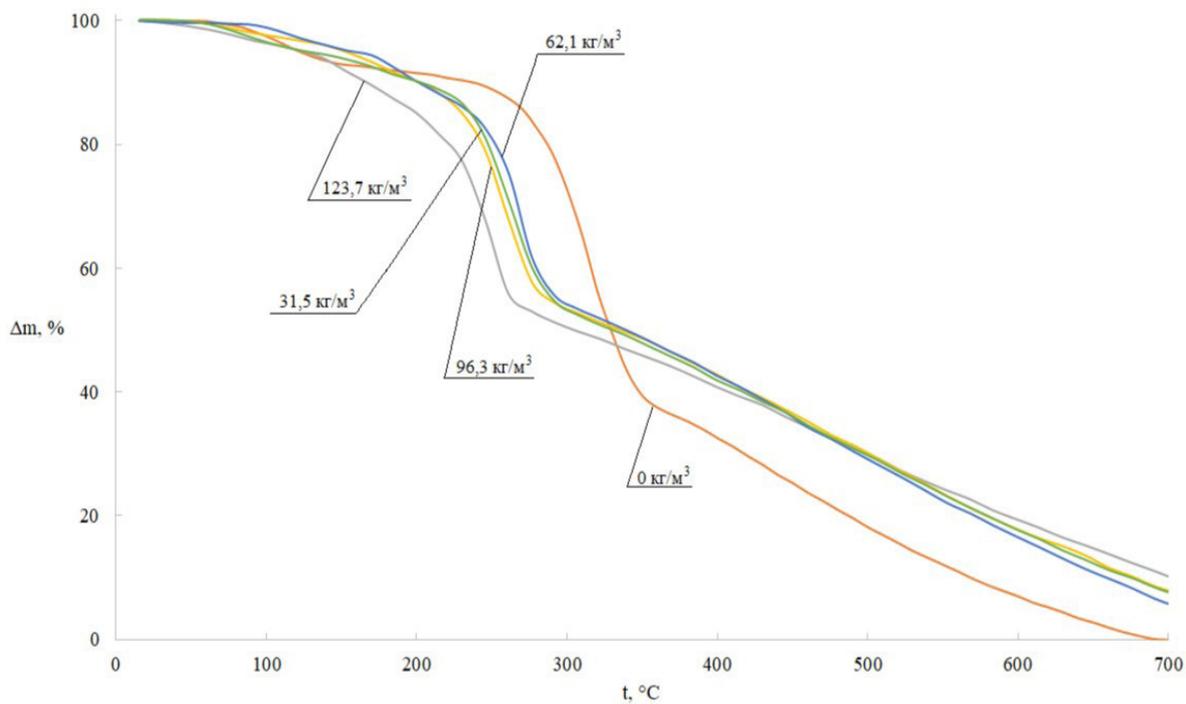
а



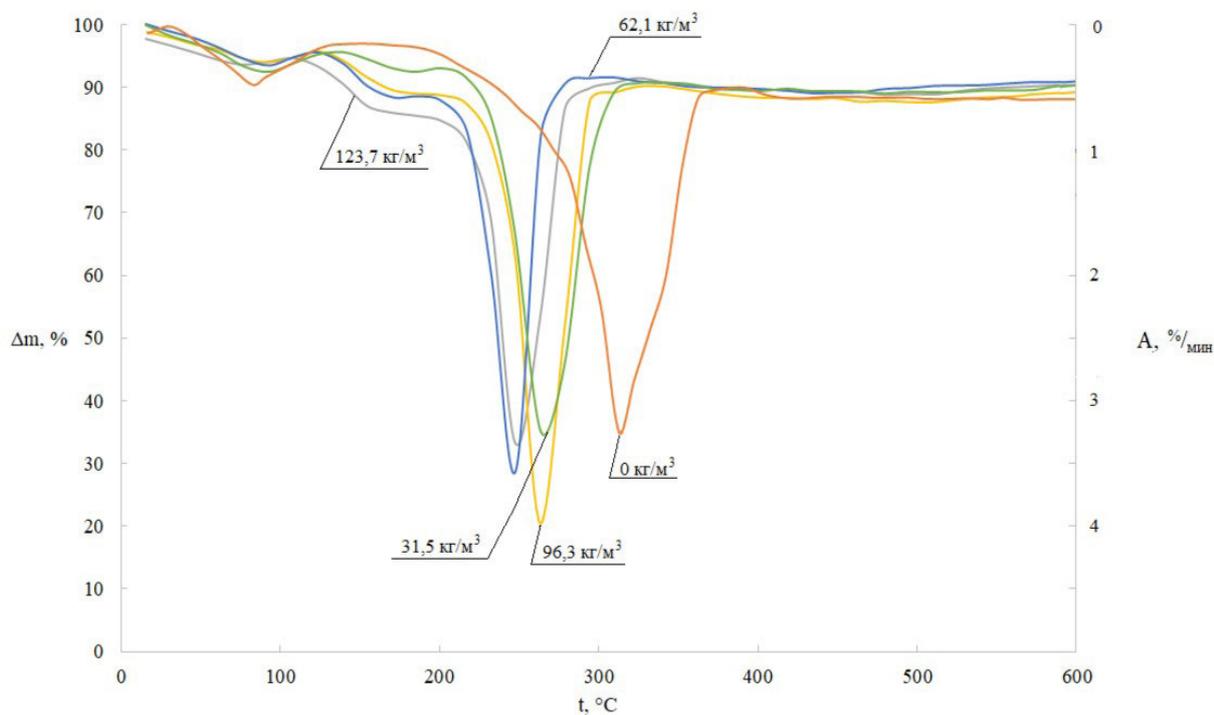
б

Рис. 1. Кривые TG (а) и DTG (б) древесины, пропитанной смесью диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 1:1 при различных поглощениях

Fig. 1. Curves TG(a) and DTG(b) of wood impregnated with a mixture of diammonium phosphate and carbamide in a 1:1 ratio at various absorbances

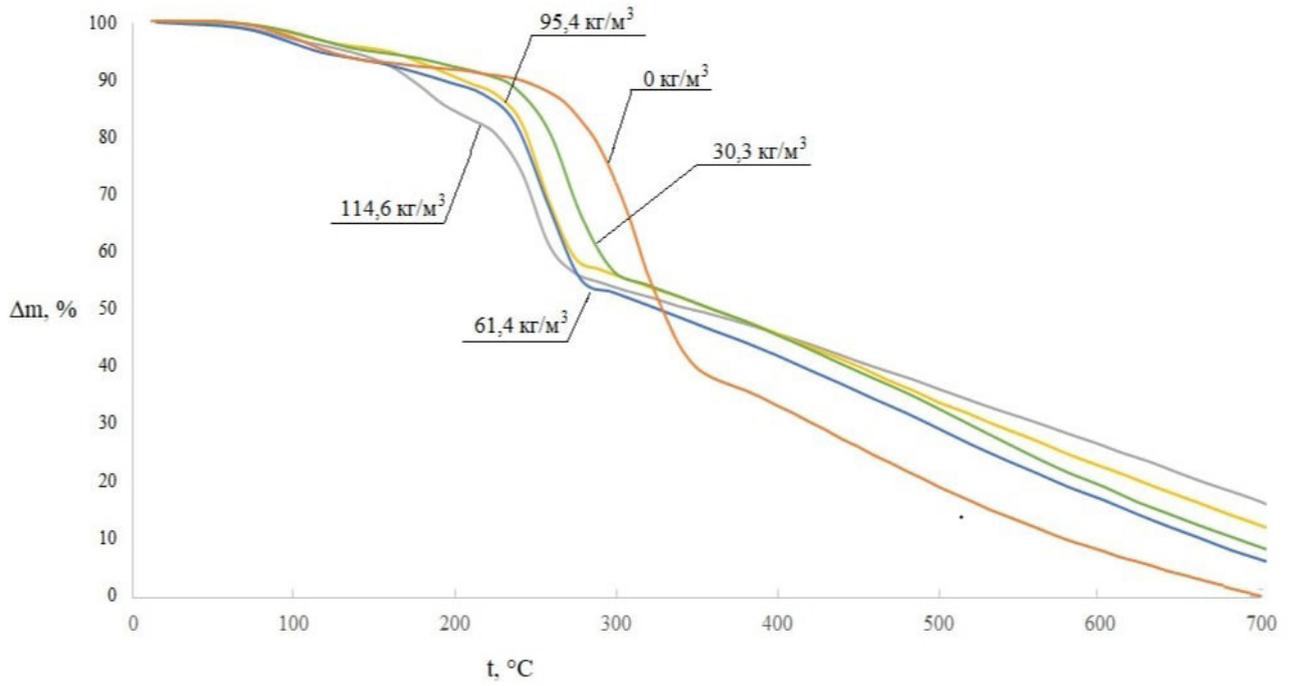


а

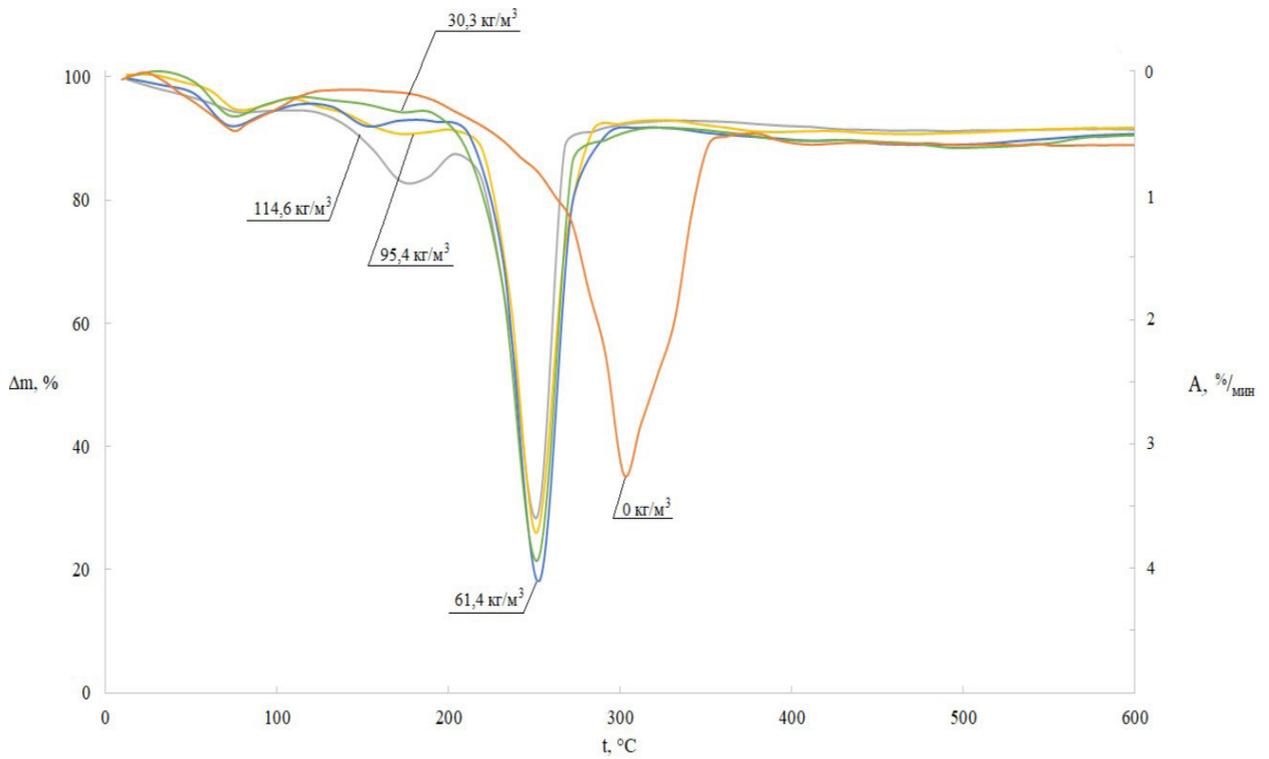


б

Рис. 2. Кривые TG (а) и DTG (б) древесины, пропитанной смесью диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 1:2 при различных поглощениях
 Fig. 2. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with a mixture of diammonium phosphate and carbamide in a ratio of 1:2 at various absorbances



а



б

Рис. 3. Кривые TG (а) и DTG (б) древесины, пропитанной смесью диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 при различных поглощениях

Fig. 3. Curves TG (a) and DTG(b) of wood impregnated with a mixture of diammonium phosphate and carbamide in a 2:1 ratio at various absorbances

ющие поглощения образцов), наблюдается изменение процесса разложения, а именно оно уже характеризуется четырьмя стадиями. Первый пик на DTG сохраняется при тех же значениях температуры, далее добавляется пик с максимумом примерно при 170–180 °С, что соответствует распаду карбамида с выделением CO_2 и воды, а затем пик основной стадии интенсивного разложения древесины, который сдвигается на 40–80 °С в область более низких температур для разных смесей и поглощений относительно чистой древесины и наблюдается в интервале от 180 до 320 °С. Четвертая стадия догорания углистого остатка становится более длительной, и полная потеря массы не наступает при температуре 700 °С, но при этом потеря массы образца наблюдается тем быстрее, чем больше содержание карбамида в смеси антипиренов.

Также стоит отметить, что интенсивность второго пика DTG от поглощения антипиренов увеличивается, а основной стадии интенсивного терморазложения (третий пик) практически не меняется, как и температуры максимумов пиков для исследуемых смесей.

По экспериментальным данным, полученным с помощью ДТА, был проведен расчет кинетических параметров основной стадии термического разложения. В таблице представлены сводные экспериментальные и расчетные данные исходной и пропитанной древесины исследуемыми антипиренами в зависимости от поглощения: температура максимума DTG-кривой, потеря массы образца при основной стадии терморазложения, максимальная скорость потери массы и рассчитанные энергия активации и предэкспоненциальный множитель в интервале температур.

На рис. 4 представлены зависимости энергии активации E_a процесса термического разложения от поглощения антипиренов. Кинетические параметры процесса для индивидуальных диаммонийфосфата и карбамида взяты из работы [9].

Анализируя полученные данные, можно отметить, что температурный интервал основной стадии терморазложения с увеличением поглощения антипиренов сужается, при этом снижается процент потери массы, но температура его максимума, как и скорость потери массы, практически не изменяется для каждой конкретной смеси. С увеличением поглощения увеличивается энергия активации процесса термического разложения основной стадии для всех смесей антипиренов, она больше, чем для непропитанной древесины. При этом максимальные значения энергии активации отмечаются для смеси диаммонийфосфат-карбамид 1:1, которые больше, чем при применении их индивидуально.

На основе полученных данных, можно сделать выводы, что введение в древесину антипиренов изменяет механизм ее разложения. Исследуемые смеси антипиренов работают по принципу более раннего (при меньших температурах) инициирования первичных процессов разложения поверхностных слоев, выделения негорючих газов CO_2 и воды за счет распада карбамида, препятствующих подводу кислорода в зону реакции, дальнейшего расщепления фосфатов, происходящего с образованием фосфорной кислоты и ее ангидридов, которые катализируют дегидратацию и дегидрирование, которые способствуют образованию карбонизованного слоя, и за счет этого последующие слои древесины разлагаются медленнее. Энергия активации при этом

Таблица
Основные параметры процесса термического разложения исходной
и пропитанной антипиренами древесины

Table
The main parameters of the thermal decomposition process of the original
and flame retardant-impregnated wood

Поглощение, кг/м ³ Absorption, kg/m ³	Температура максимума потери массы, T _{max} , °C Maximum mass loss temperature, T _{max} , °C	Максимальная скорость потери массы A _{max} , %/мин Maximum mass loss A _{max} , %/min	Потеря массы, Δm, % Потеря массы, Δm, %	Температурный интервал, °C Temperature range, °C	Энергия активации, E _a , кДж/моль Activation energy, E _a , kJ/mol	Предэкспоненциальный множитель, k The pre-exponential multiplier, k
Непропитанная древесина / Non-impregnated wood						
0	320	3,9	54,4	180–360	95,7	8,3 · 10 ¹⁰
Диаммонийфосфат — Карбамид 1:1 / Diammonium Phosphate Carbamide 1:1						
30,9	250	4,2	40,4	180–320	156,4	1,9 · 10 ¹⁸
59,6	240	4,3	34,2	185–290	186,4	4,0 · 10 ²¹
89,8	240	4,8	33,0	190–280	240,5	1,3 · 10 ²⁷
122,5	240	4,9	31,2	190–280	252,4	1,8 · 10 ²⁸
Диаммонийфосфат — Карбамид 1:2 / Diammonium Phosphate Carbamide 1:2						
31,5	260	3,7	38,8	190–320	148,3	8,5 · 10 ¹⁶
62,1	280	3,9	36,5	190–300	156,6	3,6 · 10 ¹⁷
96,3	260	3,8	35,0	200–310	160,0	1,4 · 10 ¹⁸
123,7	250	4,0	32,6	190–290	200,9	1,5 · 10 ²²
Диаммонийфосфат — Карбамид 2:1 / Diammonium Phosphate Carbamide 2:1						
30,3	260	4,2	40,0	180–320	143,5	4,6 · 10 ¹⁶
61,4	260	4,4	35,9	180–300	163,7	7,3 · 10 ¹⁸
95,4	260	4,0	30,8	195–280	182,1	7,4 · 10 ²⁰
114,6	260	3,9	25,6	210–280	232,9	3,4 · 10 ²⁵

растет, и увеличивается стойкость образца к термическому воздействию.

Для всех исследуемых смесей антипиренов была изучена огнезащитная эффективность в соответствии с требованиями ГОСТ 30028.3–2022 [12]. На рис. 5 представ-

лен график зависимости потери массы образцов от общего поглощения антипиренов.

Данные по огнезащитной эффективности для индивидуальных диаммонийфосфата и карбамида взяты из работы [9]. Наибольшую огнезащитную эффективность

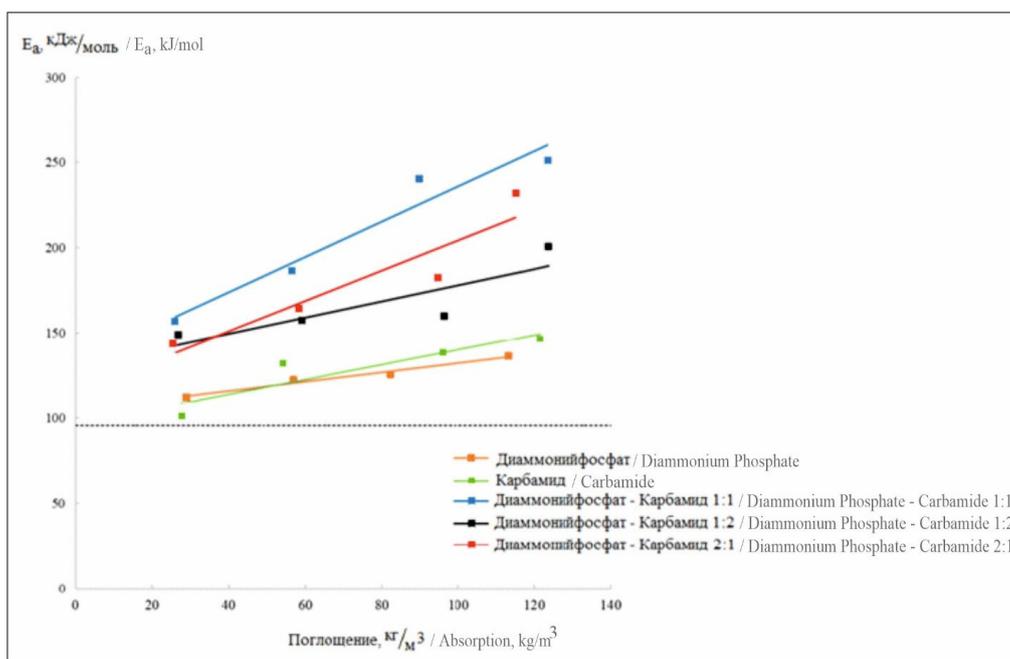


Рис. 4. Зависимость энергии активации E_a от поглощения ($\text{кг}/\text{м}^3$) антипиренов
 Fig. 4. Dependence of the E_a activation energy on the absorption ($\text{кг}/\text{м}^3$) of flame retardants

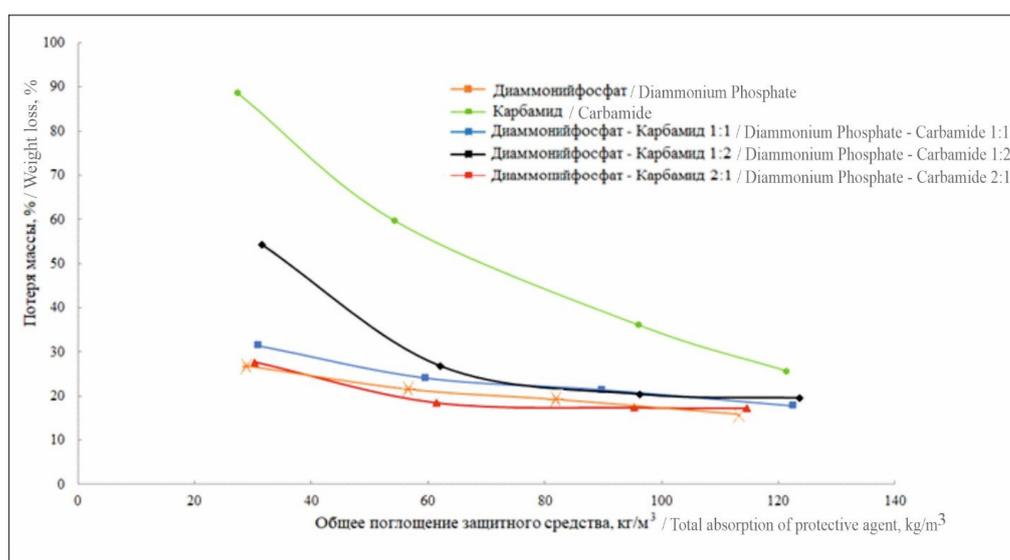


Рис. 5. График зависимости потери массы образца (%) от общего поглощения ($\text{кг}/\text{м}^3$) антипиренов
 Fig.5. Graph of the dependence of the mass loss of the sample (%) on the total absorption ($\text{кг}/\text{м}^3$) of flame retardants

проявляет смесь диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 при поглощениях от $38 \text{ кг}/\text{м}^3$ до $100 \text{ кг}/\text{м}^3$. Таким образом, эта смесь имеет схожую с чистым диаммонийфосфатом огнезащитную эффективность, но при этом стоимость карбамида практически в два раза дешевле последнего, поэтому благодаря совместному действию указанных антипиренов можно

снижать себестоимость рецептуры средства огнезащиты.

Заключение

В настоящей статье методами ДТА определены кинетические параметры основной стадии интенсивного термоокислительного разложения древесины, пропитанной

смесью диаммонийфосфата и карбамида в соотношениях 1:1, 1:2 и 2:1 с различными поглощениями. Установлено, что для всех трех смесей антипиренов энергия активации процесса возрастает с увеличением поглощения, а потеря массы уменьшается. Температура максимума потери массы при этом сдвигается на 40–80 °С в область более низких температур.

Установлено, что огнезащитная эффективность при определенной комбинации

антипиренов может взаимно усиливаться. Смесь диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 обладает наибольшей огнезащитной эффективностью, чем эти же смеси в соотношении 1:1 и 1:2 и индивидуальные антипирены. Энергия активации в смесях увеличивается на 150 кДж/моль относительно исходных антипиренов, что дополнительно подтверждает наличие синергетических эффектов в изученных смесях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование параметров воспламеняемости и процесса термоокислительного разложения древесины в присутствии эффективных средств огнебиозащиты / А. А. Кобелев [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 474–481. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-474-481>.
2. Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. № 148. pp. 1407–1422. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>.
3. Титунин, А. А., Федотов, А. А. Исследование влияния антипиренов на горючесть строительных материалов из древесины сосны и осины // Строительные материалы. 2024. № 8. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-827-8-49-55>.
4. Пиролиз обработанной огнезащитными составами древесины погонажных изделий / А. А. Решетников [и др.] // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. 2020. Т. 10, № 3. С. 285–299. DOI: <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2020-3-285-299>.
5. Огнестойкость деревянных конструкций с огнезащитными пропиточными составами / О. В. Арцыбашева [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2018. № 1 (77). С. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.1.77.12-21>.
6. Котлярова, И. А., Степина, И. В. Определение кинетических параметров термодеструкции и группы огнезащитной эффективности древесины сосны, модифицированной боразотным антипиреном // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 1. С. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-1-70-77>.
7. ГОСТ 28815–2018. Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия : межгос. стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн.

регулированию и метрологии от 3 июля 2018 г. № 373-ст ; межгос. стандарт ГОСТ 28815–2018 введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации с 1 апреля 2019 г. : дата введения 2019-04-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159813> (дата обращения: 20.02.2025).

8. Мельников, Н. О., Акинин, Н. И. Влияние антипиренов на термическое разложение древесины // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 5. С. 52–57. DOI: https://doi.org/10.53884/27132854_2022_5_52.

9. Колесова В. Ю., Бедило Н. М., Мельников Н. О. Термоанализ древесины, пропитанной диаммонийфосфатом и карбамидом // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37, № 10 (272). С. 72–75.

10. ГОСТ 8515–75. Диаммонийфосфат. Технические условия : гос. стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 сентября 1975 г. № 2438 : дата введения 1977-07-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019034> (дата обращения: 20.02.2025).

11. ГОСТ 2081–2010 Карбамид. Технические условия : межгос. стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 27 июля 2010 г. № 192-ст ; межгос. стандарт ГОСТ 2081–2010 введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации с 1 марта 2011 г. : дата введения 2011-03-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200080578> (дата обращения: 20.02.2025).

12. ГОСТ 30028.3–2022 Средства защитные для древесины. Экспресс-метод определения огнезащитной эффективности : межгос. стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 22 августа 2022 г. № 800-ст ; межгос. стандарт ГОСТ 30028.3–2022 введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации с 1 июня 2023 г. : введен взамен ГОСТ 30028.3-93 : дата введения 2023-06-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192768> (дата обращения: 20.02.2025).

REFERENCES

1. Study of flammability parameters and thermo-oxidative decomposition of wood in the presence of effective fire-bio-protection agents / A. A. Kobelev et al. // Nanotechnologies in Construction. 2023. T. 15, № 5. pp. 474–481. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-474-481>.

2. Characterization of the fire behavior of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. № 148. pp. 1407–1422. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>.

3. Titunin, A. A., Fedotov, A. A. Investigation of the effect of flame retardants on the combustibility of building materials made of pine and aspen wood // *Construction Materials*. 2024. № 8. pp. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-827-8-49-55>.

4. Pyrolysis of fire retardant-treated wood of moldings / A. A. Reshetnikov et al. // *Vestnik of Perm University. Series: Chemistry*. 2020. T. 10, № 3. C. 285–299. DOI: <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2020-3-285-299>.

5. Fire resistance of wooden structures with fire retardant impregnation compositions / O. V. Artsybasheva et al. // *Technosphere safety technologies*. 2018. № 1 (77). pp. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.1.77.12-21>.

6. Kotlyarova, I. A., Stepina, I. V. Determination of kinetic parameters of thermodestruction and fire protection efficiency group of pine wood modified with borazote flame retardant // *Vestnik of V. G. Shukhov Belarusian State Technical University*. G. Shukhov. 2020. № 1. pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-1-70-77>.

7. GOST 28815–2018. Solutions of aqueous protective agents for wood. Technical conditions : interstate standard : approved and enacted by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of July 3, 2018 № 373-st interstate standard GOST 28815–2018 enacted as a national standard of the Russian Federation from April 1, 2019. : date of introduction 2019-04-01 // *Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159813> (date of application: 20.02.2025).

8. Melnikov, N. O., Akinin, N. I. Influence of flame retardants on the thermal decomposition of wood // *Chemical Industry Today*. 2022. № 5. pp. 52–57. DOI: https://doi.org/10.53884/27132854_2022_5_52.

9. Kolesova V. Yu., Bedilo N. M., Melnikov N. O. Thermal analysis of wood impregnated with diammonium phosphate and urea // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2023. T. 37, № 10 (272). pp. 72–75.

10. GOST 8515–75. Diammonium phosphate. Technical conditions : state standard of the Union of Soviet Socialist Republics : approved and put into effect by the USSR State Committee for Standards of September 19, 1975 № 2438 : date of introduction 1977-07-01 // *Codex : electronic fund of legal and normative-technical information*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200019034> (date of application: 20.02.2025).

11. GOST 2081–2010 Urea. Technical conditions : interstate standard : approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from July 27, 2010 № 192-st interstate standard GOST 2081–2010 put into effect as a national standard of the Russian Federation from March 1, 2011. : date of introduction 2011-03-01 // *Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200080578> (date of application: 20.02.2025).

12. GOST 30028.3–2022 Protective means for wood. Express-method of determination of fire protection efficiency : interstate standard : approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from August 22, 2022 № 800-st interstate standard

GOST 30028.3–2022 put into effect as a national standard of the Russian Federation from June 1, 2023. : introduced instead of GOST 30028.3-93 : date of introduction 2023-06-01 // Codex : electronic fund of legal and normative.-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192768> (date of application: 20.02.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесова Виктория Юрьевна, студент 2 курса магистратуры кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); e-mail: vika.kolesova2015@yandex.ru

Мельников Никита Олегович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); заведующий лабораторией исследований огнестойкости строительных конструкций научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» (109428, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6); РИНЦ ID: 694341; Scopus Author ID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Монахов Антон Андреевич, ассистент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); РИНЦ ID: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Головина Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22); РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria Yu. Kolesova, 2nd year master's student, Department of Technosphere Safety, D. I. Mendeleev Russian Chemical Technology University (p. 1, 9 Miuskaya Ploshchad, Moscow, 125047, Russian Federation); e-mail: vika.kolesova2015@yandex.ru

Nikita O. Melnikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, D. I. Mendeleev Russian Chemical Technology University (p. 1, 9 Miuskaya Ploshchad, Moscow, 125047, Russian Federation); Head of the Laboratory of Fire Resistance Research of Building Structures of the Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, V. A. Kucherenko Central Scientific Research Institute of Fire and Environmental Safety in Construction, JSC "NIC "Construction" (6 2-ya Institutskaya, 109428, Moscow, Russian Federation); RSCI ID: 694341; Scopus Author ID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Anton A. Monakhov, Assistant, Department of Technosphere Safety, D. I. Mendeleev Russian Chemical Technology University (p. 1, 9 Miuskaya Ploshchad, Moscow, 125047, Russian Federation); RSCI ID: 1038060; e-mail: antonmonahov913@ yandex.ru

Ekaterina V. Golovina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Supervision and Law, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); RSCI ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2025
Одобрена после рецензирования 18.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

ДИАГНОСТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Беззапонная Оксана Владимировна, Глухих Павел Александрович,
Елфимова Марина Владимировна, Макаркин Сергей Викторович
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлен обзор накопленной информации и анализ результатов исследований для разрешения проблемы диагностики вторичных очагов пожара, формируемых при плавлении, растекании и капании горящих масс термопластичных полимерных материалов. Анализ информации, имеющейся на сегодняшний день, позволил выделить основные задачи, которые необходимо решить для диагностики вторичных очагов пожара, а также определить этапы выявления вторичных очагов пожара.

Рассмотрена методология подхода для диагностики вторичных очагов пожара с использованием метода синхронного термического анализа. Установлено, что указанным методом представляется возможным диагностировать термопластичные полимеры как кристаллической, так и аморфной природы, определить значения температур самовоспламенения, а также определить кинетические параметры для оценки возможности возгорания горючих материалов при контакте с горящими массами термопластов.

Также установлено, что ключевыми этапами диагностики формирования вторичных очагов пожара являются: сопоставление места нахождения пожарной нагрузки в виде термопластов и очаговых зон, обнаруженных в ходе осмотра места пожара; проверка выполнения условия самовоспламенения горючих материалов в сформировавшихся условиях пожара и возможность их возгорания с учетом кинетических параметров термоокислительной деструкции материалов горючей нагрузки при контакте с горящими массами термопластов. Полученные результаты будут использованы при разработке методики диагностики вторичных очагов пожара для производства пожарно-технической экспертизы.

Ключевые слова: диагностика термопластичных полимерных материалов, температура плавления, температура стеклования, термоокислительная деструкция термопластов, кинетические параметры, пожарно-техническая экспертиза.

Для цитирования: Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 67–77.

DIAGNOSTICS OF FORMATION OF SECONDARY FIRE SOURCES IN THE STUDY OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

Oksana V. Bezzaponnaya, Pavel A. Glukhikh, Marina V. Elfimova, Sergey V. Makarkin
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article presents an overview of the accumulated information and an analysis of the results of research to resolve the problem of diagnostics of secondary fire sources formed during melting, spreading and dripping of burning masses of thermoplastic polymeric materials. Analysis of the information available today allowed us to identify the main tasks that need to be solved for diagnostics of secondary fire sources, as well as to determine the stages of identifying secondary fire sources.

The methodology of the approach for diagnosing secondary fire sources using the method of synchronous thermal analysis is considered. It is established that the specified method is possible to diagnose thermoplastic polymers of both crystalline and amorphous nature, determine the values of autoignition temperatures, and also determine the kinetic parameters for assessing the possibility of ignition of combustible materials upon contact with burning masses of thermoplastics.

It is also established that the key stages of diagnostics of secondary fire sources formation are: comparison of the location of the fire load in the form of thermoplastics and focal zones detected during the inspection of the fire site; verification of the fulfillment of the condition of autoignition of combustible materials in the formed fire conditions and the possibility of their ignition taking into account the kinetic parameters of thermal-oxidative destruction of combustible load materials upon contact with burning masses of thermoplastics. The obtained results will be used in the development of a method for diagnosing secondary fire sources for the production of fire-technical expertise.

Keywords: diagnostics of thermoplastic polymeric materials, melting point, glass transition temperature, thermal-oxidative destruction of thermoplastics, kinetic parameters, fire-technical expertise

For Citation: Diagnostics of secondary fire centers formation during the study of polymeric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya et al. // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 67–77.

Введение

Определение местонахождения очага пожара — важнейшая задача, решаемая экспертами при производстве судебной пожарно-технической экспертизы (далее — СПТЭ). Известно, что в ходе пожара могут формироваться и вторичные очаги пожара (далее — ВОП), обусловленные сосредоточением горючих материалов, более благоприятными условиями горения в изучаемой области, протеканием процессов передачи теплоты, попаданием искр и тлеющих углей на воспламеняющиеся материалы вне зоны горения,

стекания горячей жидкости или расплавленных полимерных материалов, а также особенностями тушения пожара. В таких случаях от эксперта требуется решение сложной задачи по диагностике ВОП. Диагностика формирования ВОП является комплексной процедурой, включающей в себя несколько этапов проведения.

Особого внимания заслуживает рассмотрение особенностей формирования ВОП при растекании и капании горящих масс термопластичных полимерных материалов, поскольку в настоящее время в отделке помещений и их дизайне, в предметах интерьера

и быта все большее применение находят термопластичные полимерные материалы, характеризующиеся высокой пожарной опасностью. Все эти факты свидетельствует об актуальности исследований для решения задачи диагностики ВОП при производстве СПТЭ по причине перехода в текучее и вязкотекучее состояния термопластичных полимерных материалов. Примером распространения горения по причине капания расплавленных масс термопласта с формированием ВОП является пожар в ТРЦ «Зимняя вишня» в Кемерове, случившийся в марте 2018 г.

Исследование поведения полимеров при воздействии высоких температур с использованием современных и высокоточных инструментальных методов, в частности синхронного термического анализа (далее — СТА), является определяющим при диагностике формирования ВОП. Цель настоящей работы — анализ этапов проведения диагностики ВОП, в т. ч. с использованием метода СТА.

Анализ задач и этапов диагностики вторичных очагов пожара

В настоящее время накоплен уже значительный теоретический и практический материал по результатам экспериментальных исследований полимерных материалов методами термического анализа, в т. ч. : для оценки термической стабильности полимеров [1]; для определения температур фазовых переходов [2–3]; при оценке пожароопасных свойств полимеров [4–6]. Большое количество работ посвящено применению результатов экспериментальных исследований для решения как экспертных задач СПТЭ [7–12], так и для диагностики очагов пожара [13–16]

в частности. Значительный вклад в развитие представлений о закономерностях формирования очагов пожара, а также диагностике их формирования внесли работы И. Д. Чешко и представителей его научной школы [5, 7–9, 11, 13, 15]. Однако исследований, рассматривающих вопросы диагностики или дифференциации первичных и вторичных очагов пожара, практически нет, что указывает на высокую степень сложности решения поставленной задачи и актуальность исследований в этой области.

Первым этапом диагностики ВОП является осмотр места пожара. При анализе версий о причастности горящих термопластичных полимеров к формированию зон, обладающих признаками очага пожара, требуется обратить внимание на следующие моменты, которые необходимо учитывать при определении причин возгорания.

1. Наличие агломератов термопластичных полимеров в зоне первоначального возникновения горения. Такая ситуация возможна в ряде случаев. Во-первых, изделия из термопластов могли находиться в зоне очага пожара в качестве строительных или отделочных материалов, элементов вещной обстановки и электроприборов и т. д. Во-вторых, в качестве элементов источников зажигания. В-третьих, как элементы тары или упаковки для традиционных инициаторов горения, например ЛВЖ/ГЖ (рис. 1).
2. Наличие в зонах, характеризующихся наличием признаков очага пожара, а также наличие в непосредственной близости от этих зон, а в особенности над ними, остатков (агломератов) термопластичных полимеров.

В ходе осмотра места пожара необходимо уделять особое внимание поиску инфор-



Рис. 1. Термические повреждения салона автомобиля с застывшим расплавом полимера на переднем пассажирском сиденье

Fig. 1. Thermal damage to the car interior with frozen polymer melt found on the front passenger seat

мации о наличии над очаговыми зонами отделочных или строительных материалов из термопластичных полимеров (натяжные или декоративные накладные потолки, тепло- и звукоизоляция потолочных перекрытий и кровельных конструкций), а также потолочных светильников и иных устройств, для изготовления элементов которых могли использоваться такие материалы.

Важной частью диагностики ВОП является сопоставление обнаруженных очаговых зон с распределением пожарной нагрузки в помещении при учете поведения отделочных и строительных материалов в формируемых температурных условиях пожара. Осмотр места происшествия и сбор информации о распределении пожарной нагрузки в помещении являются ключевыми составляющими первого этапа диагностики ВОП и залогом успешного решения сложной диагностической задачи и формирования максимально обоснованных категоричных выводов по вопросам, поставленным на разрешение пожарно-технического эксперта.

Существенное значение для диагностики ВОП при плавлении термопластичных полимеров имеет идентификация термопластов в очаговой зоне. Проблеме идентификации полимерных материалов посвящен ряд работ [10–12]. Факт наличия термопластичных полимеров среди материалов пожарной нагрузки, способных при плавлении и капании горящих масс формировать ВОП, целесообразно устанавливать по результатам термического анализа с использованием критериев, позволяющих дифференцировать термопласты и реактопласты.

Анализ литературы свидетельствует о том, что для решения идентификационных и диагностических задач СПТЭ актуальны разработки баз физико-химических характеристик полимерных материалов, полученных современными инструментальными методами, в частности СТА.

Основным инструментом для диагностики и идентификации полимерных материалов является база данных, содержащая как термограммы, так и показатели

значимых физико-химических характеристик термолитиза полимеров. Такая база должна содержать информацию о температурах плавления (стеклования) полимерных материалов, интервале температур, в котором они находятся в расплавленном или вязкотекучем состоянии. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (далее — ДСК) позволяет диагностировать плавление полимеров, которое является фазовым переходом первого рода, а также процесс стеклования аморфных полимеров, сопровождающийся изменением теплоемкости на ДСК-кривой. На рис. 2 приведены термограммы термопластов полукристаллической (а) и аморфной природы (б).

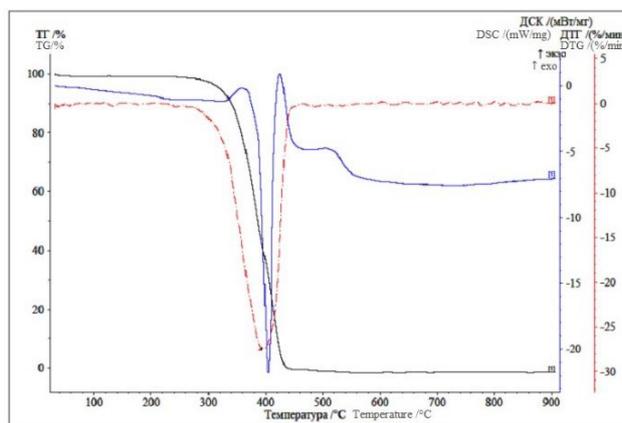
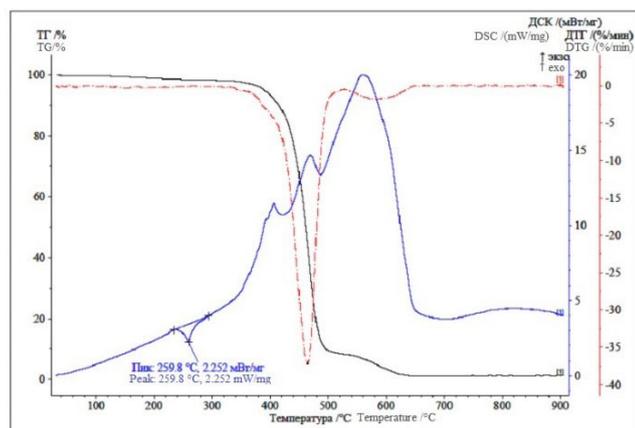


Рис. 2. Термограммы кристаллического полимера (а — полиэтилентерефталат) и аморфного полимера (б — полиметилметакрилат)

Fig. 2. Thermograms of crystalline polymer (a — polyethylene terephthalate) and amorphous polymer (b — polymethyl methacrylate)

тического интереса для экспертов, решающих диагностические задачи СПТЭ в реальных условиях пожара. Для получения достоверных результатов и выводов эксперту нужны сведения о материалах, полученные в обстоятельствах, максимально приближенных к реальным условиям пожара (в среде воздуха и при высоких скоростях нагрева).

Поскольку аморфные полимеры не имеют пика плавления (рис. 2 б), то дифференцировать их от реактопластов затруднительно, особенно в случае слабого сигнала изменения теплоемкости на ДСК-кривой аморфного полимера при реологическом переходе его из стеклообразного в эластическое состояние, что свидетельствует о целесообразности проведения дополнительных исследований для разработки способов дифференцирования аморфных термопластов и реактопластов.

Следует отметить, что существующие справочные данные по полимерам [17] содержат информацию, полученную в инертной среде и при малых скоростях нагрева (5 °С/мин или 10 °С/мин), что не имеет прак-

Кроме того, справочные данные по термодеструкции полимерных материалов из разных источников зачастую разительно отличаются друг от друга ввиду разных условий проведения испытаний и применения разного оборудования, что затрудняет и замедляет работу экспертов. Таким образом, разработка базы данных полимерных материалов, включаю-

щей в себя исчерпывающую информацию, полученную в условиях, приближенных к условиям реального пожара, является актуальной задачей, от решения которой зависит выполнение этапа диагностики термопластов в очаговой зоне или над ней с использованием метода СТА.

После сопоставления очаговых зон с распределением пожарной нагрузки необходимо провести расчеты (численный эксперимент) по оценке возможности (прогноза) возгорания рассматриваемого материала пожарной нагрузки. Оценка обозначенной возможности (прогноз) сводится к проверке условия возникновения пожара при решении уравнений теплопроводности и диффузии для элементарного объема горючего материала. При оценке возможности возгорания материала с формированием ВОП необходимо учитывать два способа: возгорание от контакта горящих масс с воспламеняемым материалом за счет использования кинетических параметров его термоокислительной деструкции (далее — ТОД) и самовозгорания материала в температурных условиях развившегося пожара в результате процессов конвекции, теплопроводности и лучистого обмена.

Возгорание может происходить от контакта с нагретым телом (фрикционные искры, раскаленная спираль, капли расплавленного металла или термопласта, тлеющие угли и др.). В работе [18] возможность воспламенения материала от раскаленной фрикционной частицы проверяется выполнением условия возникновения горения по результатам расчета диаметра раскаленной частицы металла и времени ее воздействия на материал. Возгорание от капяющих масс расплавленного полимера может происходить только в том случае, если объем го-

рящей массы не является критично малой величиной, если температура горения полимерного материала достаточна для зажигания горючего материала и если достаточно времени для контакта горящей массы с горючим материалом.

Для определения возможности воспламенения материала необходимо знать кинетические параметры (порядок реакции, энергию активации, предэкспоненциальный множитель) процесса ТОД горючей нагрузки, в частности полимерных материалов. Кинетические параметры процесса ТОД материала могут быть получены по результатам СТА. В настоящее время разработано и широко применяется множество методов расчета кинетических параметров с использованием экспериментальных данных динамической термогравиметрии. Подробное рассмотрение классификации методов их расчета приведено в работе [19]. Для расчета кинетических параметров используются данные как нескольких термогравиметрических кривых (ТГ-кривых), снятых при разных скоростях нагрева, так и данные одной ТГ-кривой, что значительно сокращает продолжительность этого процесса. Обработка данных, полученных в неизотермических условиях, может быть проведена различными методами, например Флинна–Уолла–Озавы (ASTM E698), Киссинджера, Фридмана, Озавы–Флинна–Уолла (изоконверсионный).

Эффективность производства СПТЭ диктует необходимость применения методических подходов для решения диагностических задач, сочетающих в себе точность и простоту вычисления конечного результата. При этом для получения достоверных результатов условия проведения испытаний исследуемых материалов должны быть максимально приближены к условиям тем-

пературного режима пожара, поскольку макрокинетика и механизм протекания термодеструкции полимеров зависит от скорости нагрева. В связи с этим выбор адекватного метода расчета кинетических параметров ТОД полимеров методом ТГ-анализа в условиях проведения испытаний, максимально приближенных к реальным условиям пожара, является актуальной и важной задачей.

Анализ результатов исследований [12, 20], в которых рассматривается оценка кинетических параметров процесса ТОД полимеров, показал, что наиболее простым в использовании и достаточно точным методом для решения прикладных задач является метод, предложенный Бройдо, в котором кинетические параметры определяются с использованием результатов динамической термогравиметрии при одной скорости нагрева. Этот метод с тех пор получил свое развитие и применяется для оценки срока службы полимеров.

Таким образом, диагностика формирования ВОП является комплексной задачей, решение которой требует большого объема исходных данных, полученных как при осмотре места пожара, так и в ходе испытаний полимерных материалов методом СТА.

Выводы

Анализ работ по изучению вопроса формирования ВОП показал, что очаг по-

жара может быть квалифицирован как вторичный при выполнении следующих условий:

- установление факта наличия пожарной термопластичной полимерной нагрузки в очаговой зоне или над ней с использованием метода СТА и базы данных термоаналитических характеристик и термограмм полимерных материалов;
- установление возможности возгорания материалов пожарной нагрузки от капаящих и растекающихся горящих масс термопластов в температурных условиях развившегося пожара с использованием расчетного метода и данных, полученных с помощью СТА, в обстоятельствах, максимально приближенных к реальным условиям пожара.

Для проверки этих условий эксперту необходим методический аппарат (алгоритм действий), а также справочные данные по физико-химическим характеристикам полимерных материалов (температура плавления, температура стеклования, температура ТОД), база данных (термограмм) для диагностики полимеров с места пожара, кинетические параметры и тепловой эффект ТОД полимеров для оценки возможности возгорания, значения показателей пожарной опасности полимеров (температура самовоспламенения) — все указанное требует проведения большого объема исследований и разработки методологии диагностики формирования ВОП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties / Z. Jia et al. // Journal of Polymer Science. 2023. Vol. 61, № 19. pp. 2229–2302. DOI: <https://doi.org/10.1002/pol.20230295>.

2. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications / edited by Joseph D. Menczel, R. Bruce Prime. Hoboken : Wiley, 2008. 688 p.
3. Ehrenstein, G. W., Riedel, G., Trawiel, P. Thermal Analysis of Plastics — Theory and Practice. Munich : Carl Hanser Verlag, 2004. 400 p. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997> (date of application: 29.01.2024).
4. Беззапонная О. В. Определение температуры самовоспламенения веществ и материалов методом синхронного термического анализа // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 2 (104). С. 177–187.
5. О роли горящих полимеров в возникновении и развитии пожара // Расследование пожаров : сб. ст. / А. Ю. Мокряк [и др.] / под общ. ред. И. Д. Чешко. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. Т. 6. С. 119–124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40834955> (дата обращения: 05.06.2024).
6. Исследование пожароопасных свойств полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 13–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50105539> (дата обращения: 14.03.2024.).
7. Чешко, И. Д., Принцева, М. Ю., Лобанова, О. В. Инструментальные методы в современной пожарно-технической экспертизе // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2020. № 4. С. 29–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430192> (дата обращения: 15.02.2024.).
8. Принцева М. Ю., Чешко И. Д. Применение термического анализа в экспертных исследованиях по делам о пожарах // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск : Сибирская пожарно-спасательная академия, 2019. С. 260–270.
9. Применение термического анализа при исследовании и экспертизе пожаров : методическое пособие / Е. Д. Андреева [и др.]. М. : ВНИИПО, 2013. 60 с.
10. Беззапонная, О. В., Хабибова, К. И. Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертизы // Техносферная безопасность. 2022. № 1 (34). С. 85–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48167930> (дата обращения: 12.02.2023).
11. Принцева М. Ю., Лобова С. Ф. Применение термического анализа для расчета кинетических параметров термодеструкции полимеров при выполнении реконструкции пожара // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 2020. С. 95–99.
12. Беззапонная О. В., Глухих П. А., Макаркин С. В. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 1. С. 24–35.
13. Применение инструментальных методов и технических средств в экспертизе пожаров : сб. метод. рек. / под ред. И. Д. Чешко, А. Н. Соколовой. СПб. : СПбФ ВНИИПО МЧС России, 2008. 279 с.
14. Характеристики типичного очага пожара в помещении / А. О. Жданова [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 1. С. 145–151.

15. Тумановский А. А., Субботин А. А., Чешко И. Д. Применение расчетных методов при определении очага пожара : учеб.-метод. пособие. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2018. 84 с.
16. Лобаев, И. А., Плешаков, В. В., Джуган, В. Р. Ретроспективный анализ исследований по установлению очага пожара // Технологии техносферной безопасности. 2021. № 3 (93). С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.3.93.61-72>.
17. Wunderlich B. Thermal Analysis of Polymeric Materials (ATHAS data bank) // Springer. Berlin. 2005. pp. 777–800.
18. Методические основы установления причастности фрикционных искр угловых шлифовальных машин к возникновению пожара: методические рекомендации / А. В. Попов [и др.] / под ред. проф. И. Д. Чешко. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. 51 с.
19. Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro et al. // Appl. Sci. 2021. № 11. P. 11300. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112311300>.
20. Беззапонная О. В., Глухих П. А., Макаркин С. В. Исследование особенностей термоокислительной деструкции эластичного пенополиуретана для решения диагностических задач пожарно-технической экспертизы // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 155–163.

REFERENCES

1. Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties / Z. Jia et al. // Journal of Polymer Science. 2023. Vol. 61, № 19. pp. 2229–2302. DOI: <https://doi.org/10.1002/pol.20230295>.
2. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications / ed. by Joseph D. Menczel, R. Bruce Prime. Hoboken : Wiley, 2008. 688 p.
3. Ehrenstein, G. W., Riedel, G., Trawiel, P. Thermal Analysis of Plastics — Theory and Practice. Munich : Carl Hanser Verlag, 2004. 400 p. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997> (date of application: 29.01.2024).
4. Bezzaponnaya O. V. Determination of the self-ignition temperature of substances and materials by the method of synchronous thermal analysis // Technosphere safety technologies. 2024. № 2 (104). pp. 177–187.
5. On the role of burning polymers in the occurrence and development of fire // Fire Investigation : a collection of articles / A. Y. Mokryak et al. / ed. by I. D. Cheshko. D. Cheshko. SPb. : St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. T. 6. pp. 119–124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40834955> (date of application: 05.06.2024).
6. Investigation of fire hazard properties of polymeric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya et al. // Technospheric safety. 2023. № 4 (41). pp. 13–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50105539> (date of application: 14.03.2024.).

7. Cheshko, I. D., Printseva, M. Y., Lobanova, O. V. Instrumental methods in modern fire and technical expertise // Supervisory activity and forensic expertise in the security system. 2020. № 4. pp. 29–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430192> (date of application: 15.02.2024.).
8. Printseva M. Y., Cheshko I. D. Application of thermal analysis in expert studies on fire cases // Actual problems of fire safety and protection from emergency situations : a collection of articles on the materials of the All-Russian scientific and practical conference Zheleznogorsk : Siberian Fire and Rescue Academy, 2019. pp. 260–270.
9. Application of thermal analysis in the study and examination of fires : methodological manual / E. D. Andreeva et al. M. : VNIPO, 2013. 60 p.
10. Bezzaponnaya, O. V., Habibova, K. I. Application of thermal analysis method in the identification of thermoplastics and reactoplastics within the framework of fire technical expertise // Technospheric safety. 2022. № 1 (34). pp. 85–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48167930> (date of application: 12.02.2023).
11. Printseva M. Yu., Lobova S. F. Application of thermal analysis to calculate kinetic parameters of polymer thermodegradation when performing fire reconstruction // Modern fire-safe materials and technologies : proceedings of the IV Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Ivanovo, 2020. pp. 95–99.
12. Bezzaponnaya O. V., Glukhikh P. A., Makarkin S. V. Identification of thermoplastic polymers by the method of synchronized thermal analysis // Pozharovzryvzvodorozasnost. 2024. T. 33, № 1. pp. 24–35.
13. Application of instrumental methods and technical means in the examination of fires : a collection of methodical references. / ed. by I. D. Cheshko, A. N. Sokolova. D. Cheshko, A. N. Sokolova. SPb. : SPbF VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2008. 279 p.
14. Characteristics of a typical fire center in a room / A. O. Zhdanova et al. // Engineering and Physical Journal. 2023. T. 96, № 1. pp. 145–151.
15. Tumanovsky A. A., Subbotin A. A., Cheshko I. D. Application of calculation methods in determining the fire center : textbook. SPb. : St. Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2018. 84 p.
16. Lobaev, I. A. Pleshakov, V. V., Dzhugan, V. R. Retrospective analysis of research on the establishment of the fire origin // Technospheric safety technologies. 2021. № 3 (93). pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.3.93.61-72>.
17. Wunderlich B. Thermal Analysis of Polymeric Materials (ATHAS data bank) // Springer. Berlin. 2005. pp. 777–800.
18. Methodical bases for establishing the involvement of friction sparks of angle grinders in fire: methodical recommendations / A. V. Popov et al. / ed. by Prof. I. D. Cheshko. SPb. : St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. 51 p.
19. Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro et al. // Appl. Sci. 2021. № 11. P. 11300. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112311300>.
20. Bezzaponnaya O. V., Glukhikh P. A., Makarkin S. V. Study of the features of thermo-oxidative degradation of elastic polyurethane foam. V. Research of features of thermo-oxidative degradation of elastic polyurethane foam for solving diagnostic tasks of fire technical expertise // Problems of risk management in technosphere. 2024. № 4 (72). pp. 155–163.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беззапонная Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доц., Почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); ORCID: 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ID РИНЦ: 119257; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Глухих Павел Александрович, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доц., заместитель начальника по научной работе Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); AuthorID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003; e-mail: elfimar@mail.ru

Макаркин Сергей Викторович, канд. юрид. наук, доц., начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana V. Bezzaponnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ORCID: 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; RINC ID: 119257; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Pavel A. Glukhikh, Senior Lecturer, Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of Research of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459; e-mail: elfimar@mail.ru

Sergey V. Makarkin, Cand. Sci. (legal), Associate Professor, Head of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru

УДК 614.844.2+614.842.612

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО ТУМАНА

Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна, Тужиков Евгений Николаевич
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Высокодисперсный водяной туман (ВВТ) представляет собой устойчивый аэрозоль, состоящий из воздушной дисперсионной среды и мельчайших капель воды, диаметр которых составляет всего несколько микрон. В последние годы активно изучается использование ВВТ для пожаротушения в замкнутых объемах, поскольку он является экологически чистым и высокоэффективным средством, обладающим газообразными свойствами. Практическое применение ВВТ позволит осуществить эффективное объемное тушение и значительно снизить ущерб от пожаров. В настоящей работе приводятся результаты исследований оптической плотности высококонцентрированного ВВТ модифицированного малыми добавками высших жирных насыщенных спиртов (ВЖС). Их монослой, образующийся на поверхности капли воды, многократно замедляет процесс испарения, что способствует повышению устойчивости ВВТ, необходимой для эффективного тушения. Измерения оптической плотности проводились в закрытой испытательной камере, где ВВТ создавался с использованием ультразвукового генератора. При увеличении концентрации ВЖС и времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере устойчивость плотного ВВТ увеличивается за счет образования монослоя на поверхности капель. Проведен анализ возможных механизмов увеличения устойчивости ВВТ, что может сыграть важную роль в процессе объемного пожаротушения.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, объемное пожаротушение, ультразвуковое распыление, монослой, высший жирный спирт

Для цитирования: Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Экспериментальное исследование повышения устойчивости высокодисперсного водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 78–89.

EXPERIMENTAL STUDY OF INCREASING THE STABILITY OF HIGHLY DISPERSED WATER MIST

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Highly dispersed water mist is a stable aerosol consisting of an air dispersion medium and tiny water droplet with a diameter of only a few microns. In recent years, the use of highly dispersed water mist for fire extinguishing in closed spaces has been actively studied, since

it is an environmentally friendly and highly effective agent with gaseous properties. Practical application of highly dispersed water mist will allow for effective volumetric extinguishing and significantly reduce damage from fires. This paper presents the results of studies of the optical density of highly concentrated dispersed water mist modified with small additives of higher fatty saturated alcohols. Their monolayer, formed on the surface of a water droplet, repeatedly slows down the evaporation process, which contributes to an increase in the stability of highly dispersed water mist necessary for effective extinguishing. Optical density measurements were carried out in a closed test chamber, where highly dispersed water mist was created using an ultrasonic generator. With an increase in the concentration of higher fatty saturated alcohols and the time of maintaining a given concentration of highly dispersed water mist in the test chamber, the stability of the dense of highly dispersed water mist increases due to the formation of a monolayer on the surface of the droplets. The analysis of possible mechanisms for increasing the stability of highly dispersed water mist is carried out, which can play an important role in the process of volumetric fire extinguishing.

Keywords: highly dispersed water mist, volumetric fire extinguishing, ultrasonic atomization, monolayer, higher fatty alcohol

For Citation: Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Experimental study of increasing the stability of highly dispersed water mist // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 78–89.

Введение

Как экспериментальные, так и теоретические исследования показали, что эффективность объемного пожаротушения повышается за счет увеличения дисперсности воды, которая распыляется и используется для тушения [1]. Для большей результативности этого процесса требуется создать за короткий промежуток времени водные аэрозоли, обладающие высокой стабильностью, дисперсностью и концентрацией.

В последние годы активно ведутся теоретические и экспериментальные исследования объемного тушения высокодисперсным водяным туманом (далее — ВВТ), создаваемым с помощью ультразвуковой технологии. Этот способ основан на воздействии ультразвуковых колебаний, генерируемых пьезокерамическим излучателем с частотой свыше 1 МГц, на слой воды и водных растворов [2].

Развитие обозначенного направления связано как с совершенствованием ультразвуковых технологий распыления, так и с несомненными преимуществами получаемого с помощью ультразвука ВВТ по сравнению с другими способами диспергации жидкостей. Срок жизни низкоконцентрированного ВВТ в замкнутом объеме со 100 % относительной влажностью может составлять несколько часов [3], а образующие туман капли имеют очень узкое распределение по размерам со средним диаметром всего в несколько микрон [4].

Практическим, в т.ч. полномасштабным, экспериментам по ликвидации очага возгорания с применением ВВТ посвящен ряд работ [5, 6, 7], при этом тушащая концентрация ВВТ может достигать 100 г/м³ [5, 7], что является одним из самых низких значений среди всех известных огне-тушащих веществ.

Ультразвуковые генераторы ВВТ, которые могут диспергировать около 1 л/мин и при незначительных изменениях в конструкции могут найти применение в системах объемного пожаротушения, уже имеются в продаже. Примечательно, что указанная технология ультразвукового распыления воды в настоящее время является единственным методом, способным одновременно достичь высокой производительности, однородности и дисперсности.

Следует указать, что наряду с такими механизмами прекращения горения, как охлаждение, разбавление, изоляция и снижение теплопередачи, при тушении ВВТ выявлены механизмы химического торможения отдельных стадий реакции горения [8]. Таким образом, при применении ВВТ реализуются практически все механизмы прекращения горения.

Создание и поддержание высокой концентрации ВВТ, необходимой для эффективного объемного пожаротушения, сталкивается со значительными трудностями. Так, например, с повышением концентрации ВВТ скорость его разрушения или «старения» быстро увеличивается [5, 9]. Для полной ликвидации горения, особенно тлеющего, необходимо достаточно длительно поддерживать концентрацию ВВТ выше тушащей [5].

Получение ультразвукового ВВТ характеризуется низкой расчетной технологической эффективностью. Так, высокопроизводительные ультразвуковые генераторы ВВТ потребляют до 0,6 кВт для распыления 100 мл/мин воды. Однако даже незначительное повышение этой эффективности, например искусственное замедление процесса «старения» тумана, может значительно ускорить внедрение ультразвуковых технологий для объемного пожаротушения.

Процесс искусственного туманообразования можно разделить на две части: увлажнения воздуха до 100 % относительной влажности, а затем создание атмосферы витающих — свободно перемещающихся в различных направлениях — мельчайших капелек воды [3].

Устойчивость, как и противоположенный процесс — разрушение туманов, обусловлена протеканием и взаимодействием процессов испарения, конденсации, коагуляции, коалесценции и седиментации в их дисперсной фазе. Применительно к объемному пожаротушению повышение устойчивости плотного (высоконцентрированного) ВВТ относится к замедлению указанных процессов при 100 % относительной влажности окружающего воздуха.

Согласно закону Стокса, подтвержденному многочисленными исследованиями, скорость седиментации (гравитационного осаждения) наиболее крупных капель в спектре ультразвукового ВВТ (10 мкм в нормальных условиях) составляет около 3 мм/с. Несмотря на столь небольшую скорость, гравитационное осаждение продолжает оставаться одной из основных причин низкой устойчивости плотного ультразвукового тумана. Это обстоятельство обуславливается переконденсацией, или Оствальдовским созреванием, — процессом, при котором происходит испарение мелких капель с последующей конденсацией образовавшихся паров на более крупных каплях при 100 % относительной влажности окружающего воздуха. Так происходит вследствие того, что мелкие капли имеют большую кривизну поверхности, чем крупные, и потому давление насыщенных паров над ними будет выше, чем над крупными каплями.

Указанный процесс приводит к тому, что даже при 100 % относительной влажности происходит быстрое уменьшение мелких и увеличение крупных капель, особенно в условиях плотного тумана, что вызывает значительное увеличение интенсивности и других процессов, приводящих к разрушению ВВТ: седиментации, коагуляции и коалесценции.

Конденсированные пленки, или монослои, образованные на поверхности воды, могут замедлять скорость испарения во много раз. Монослои представляют собой поверхностные пленки толщиной в одну молекулу, покрывают всю поверхность воды и образуются органическими амфифильными молекулами, такими как высшие жирные насыщенные спирты (далее — ВЖС) и их производные [10].

Исследованию вопроса о замедляющем влиянии монослоев ВЖС в процессах испарения и конденсации воды посвящено большое количество работ [10, 11, 12]. Имеющиеся в этой области научные публикации о каплях воды микронных размеров сосредоточены на отдельных частицах и/или небольших коллективах частиц при относительной влажности окружающей атмосферы меньше 100 %. Из анализа литературы следует, что исследований влияния добавок ВЖС на устойчивость макрообъемов плотных ВВТ ранее не проводилось.

Нами не найдено сведений об исследованиях, посвященных повышению устойчивости плотных ВВТ в макрообъемах, применимых для объемного пожаротушения, с помощью монослоев ВЖС. Отсюда следует вывод об актуальности проведения соответствующих научно-исследовательских работ.

Экспериментальная методика

Исследования влияния монослоя ВЖС на устойчивость ВВТ проводились путем определения временных изменений оптической плотности водного аэрозоля, полученного в герметичной испытательной камере с помощью ультразвукового генератора ВВТ.

Оптическая плотность — это физическая величина, равная десятичному логарифму отношения интенсивности света, падающего на слой ВВТ, к интенсивности света, прошедшего через этот слой. Оптическая плотность однозначно характеризует концентрацию ВВТ в измеряемом слое, и ее изменение является часто применяемым критерием для определения устойчивости или скорости «старения» тумана.

Измерения оптической плотности ВВТ проводились с помощью серийного прибора «ИОПД-5М» [13], соединенным с компьютером, на котором записывались полученные данные в виде таблиц и графиков.

Для исследования влияния монослоя ВЖС на устойчивость ВВТ создан испытательный стенд (рис. 1), состоящий из герметичной испытательной камеры 1 с прозрачными окнами (условно не показаны). Свободный объем камеры — 84 л, а расстояние между окнами (зона измерения) — 0,4 м. Внутри камеры находился ультразвуковой генератор ВВТ 2. За пределами испытательной камеры вплотную к входному и выходному окнам размещались блок излучателя 3 и блок фотоприемника 4 инфракрасного луча 5. Указанные окна располагались в стенках испытательной камеры перпендикулярно световому лучу, и для предотвращения конденсации тумана на внутренних поверхностях они были покры-

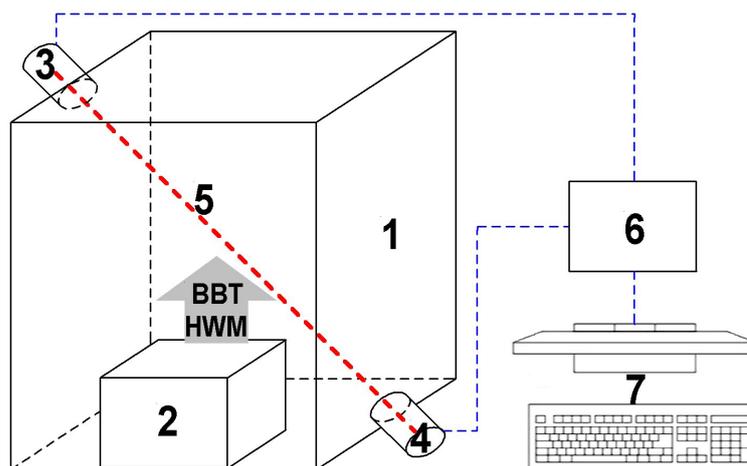


Рис. 1. Схема испытательного стенда для измерения оптической плотности ВВТ, где: 1 — испытательная камера; 2 — ультразвуковой генератор ВВТ; 3 — блок излучателя; 4 — блок фотоприемника; 5 — инфракрасный луч; 6 — блок управления прибора «ИОПД-5М»; 7 — компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the test bench for measuring the optical density of highly dispersed water mist where: 1 — test chamber; 2 — ultrasonic generator of highly dispersed water mist; 3 — emitter unit; 4 — photodetector unit; 5 — infrared beam; 6 — control unit of the device “IOPD-5M”; 7 — computer

ты гидрофобным составом. Блок управления 6 прибора «ИОПД-5М» соединялся с компьютером 7 по интерфейсу RS-232.

Используемый ультразвуковой генератор с регулируемым расходом ВВТ и частотой колебаний пьезокерамического излучателя 1,7 МГц генерирует капли со средним заутеровским диаметром в диапазоне 4–5 мкм. Ультразвуковой генератор дополнительно оснащен системой автоматического поддержания повышенной температурой распыляемой воды.

Прибор «ИОПД-5М» предназначен для измерения оптической плотности среды, через которую проходит инфракрасный луч с длиной волны в диапазоне 850–950 нм. Для управления измерительным процессом, обработки, отображения и сохранения на компьютере полученных от прибора «ИОПД-5М» данных использовалось поставляемое вместе с прибором программное обеспечение «ИОПД-5М Монитор» [13].

Из предыдущих исследований известно, что увеличение длины углеродной цепи ВЖС

с $n = 12$ до $n = 18$ уменьшает коэффициент испарения воды через монослой примерно в 300 раз. В то же время резкое увеличение коэффициента испарения с повышением температуры воды согласуется с приближением к температуре плавления ВЖС. При ее достижении защитное действие монослоя практически прекращается [12].

Вышеуказанные обстоятельства обусловили выбор смеси равных частей цетилового ($n = 16$) и стеарилового ($n = 18$) спиртов в качестве ВЖС при проведении настоящего исследования. Кроме того, указанный выбор связан с широким использованием этого реагента, а соответственно, с его дешевой и доступностью. Смесь цетилового и стеарилового спиртов масштабно применяется для замедления испарения воды из пресных водоемов в засушливых регионах. Температура плавления указанной смеси ВЖС находится в диапазоне 49–59 °С.

Выбранные ВЖС практически нерастворимы в воде. Для образования монослоя на каплях ВВТ необходимо равномер-

но распределить ВЖС внутри всего объема распыляемой воды, что достигается путем эмульгирования ВЖС в воде.

Стабильная эмульсия типа «масло в воде» готовилась следующим образом. Необходимое количество ВЖС растворялось в этиловом спирте. Этот раствор медленно вливался в воду, нагретую до температуры ~ 70 °С, при интенсивном перемешивании с помощью высокоскоростного электрического миксера. Процесс продолжался до охлаждения полученной жидкости ниже температуры плавления ВЖС. За это время практически весь этиловый спирт испарялся. Аналогичная процедура получения эмульсии ВЖС в воде применялась в других научных работах, посвященных исследованию влияния монослоя ВЖС на испарение капель воды [14].

Предварительные эксперименты по ультразвуковому распылению полученных эмульсий показали, что с увеличением концентрации ВЖС в эмульсии интенсивность образования ВВТ снижалась. При концентрации ВЖС свыше $\sim 0,25$ г/л и температуре эмульсии 25 °С образование ВВТ практически не происходит. Это обстоятельство объясняется тем, что вязкость эмульсии повышается с ростом концентрации ВЖС, а производительность ультразвукового генератора ВВТ уменьшается с увеличением вязкости распыляемой жидкости.

В настоящем исследовании для снижения вязкости эмульсий применялось автоматическое поддержание повышенной до 40 °С температуры всех распыляемых жидкостей внутри генератора ВВТ. При этом нагреванию подвергался только небольшой объем жидкости ~ 100 мл, который непосредственно контактировал с пьезокерамическим излучателем.

Исследования проводились на чистой воде и при двух значениях концентрации ВЖС в эмульсии — 0,1 г/л и 0,2 г/л. Расход ВВТ около 7 г/мин поддерживался примерно постоянным во всех экспериментах по определению оптической плотности.

Схема экспериментов была следующей. В испытательной камере включался ультразвуковой генератор ВВТ, при достижении удельной оптической плотности — 7,5 дБ/м — генератор выключался, одновременно с выключением генератора начинались запись полученных данных и вывод на экран компьютера в виде графика зависимости измеренных значений оптической плотности от времени эксперимента.

Значение удельной оптической плотности — 7,5 дБ/м — было выбрано на основании максимального значения диапазона измерений оптической плотности для прибора «ИОПД-5М» — 3 дБ, и длины зоны измерений в испытательной камере — 0,4 м. Кроме указанного обстоятельства значение 7,5 дБ/м примерно соответствует минимальной тушащей концентрации для ВВТ ~ 100 г/м³, что следует из эмпирической формулы, приведенной в работе [15].

Давление, температура и относительная влажность окружающего воздуха во время всех экспериментов были вблизи 0,098 МПа, 298 К и 30 % соответственно. Для каждого опытного сценария проводилось не менее трех экспериментов с одинаковыми условиями в пределах ошибки измерений.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов по определению оптической плотности ВВТ было установлено, что даже небольшие

добавки ВЖС оказывают существенное стабилизирующее действие на водный туман.

На рис. 2 приведены графики, показывающие ход изменения удельной оптической плотности (D , дБ/м) со временем (t , с).

При увеличении концентрации ВЖС от 0 (график 1) до 0,2 г/л (график 3) время двукратного уменьшения удельной оптической плотности (от 7,5 до 3,75 дБ/м) выросло примерно в два раза — от 33 до 63 с. Из све-

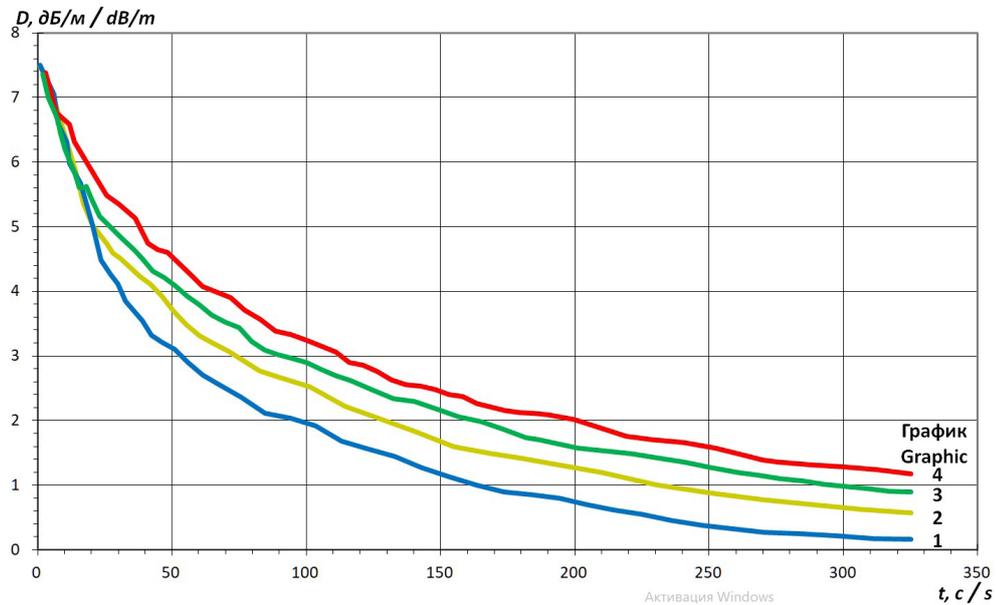


Рис. 2. Зависимости удельной оптической плотности ВВТ от времени для различных концентраций ВЖС: график 1 — 0 г/л, график 2 — 0,1 г/л, графики 3 и 4 — 0,2 г/л; график 4 — увеличено на 5 мин время нагнетания ВВТ в испытательную камеру

Fig. 2. Specific optical density dependencies of highly dispersed water mist on time for different concentrations of higher fatty saturated alcohols: graph 1 — 0 g/l, graph 2 — 0,1 g/l, graphs 3 and 4 — 0,2 g/l; graph 4 — injection time of highly dispersed water mist into the test chamber increased by 5 min

дений, приведенных на рис. 2, следует, что при добавке в воду всего 0,02 мас. % ВЖС значительно повышается устойчивость ВВТ.

Обнаруженное повышение устойчивости ВВТ при малых добавках ВЖС согласуется с результатами других работ, где указывается в частности, что скорость испарения капель воды, полностью покрытых монослоем ВЖС, уменьшается на много порядков [10, 11, 12].

Ожидалось, что указанное драматическое снижение скорости испарения, даже при малых добавках ВЖС, должно привести к многократному повышению устойчивости плотного ВВТ, однако, исходя из результатов проведенных экспериментов, этого не про-

изошло. Указанное обстоятельство может быть объяснено как сравнительной инерционностью процесса образования конденсированного монослоя, так и недостаточной концентрацией ВЖС.

Процесс образования монослоя может быть представлен двумя стадиями: выход ВЖС из объема на поверхность капли и, если концентрации ВЖС недостаточно для образования монослоя, уменьшение капли за счет испарения до размера, достаточного для образования конденсированного монослоя. В работе [12] указывается, что при концентрациях ВЖС, аналогичных применяемым в настоящем исследовании, диаметр

исходной капли при испарении уменьшался примерно в 1,3 раза, прежде чем слой ВЖС покрывал всю ее поверхность.

Для оценки влияния инерционности процесса образования конденсированного монослоя на устойчивость ВВТ была проведена дополнительная серия экспериментов при концентрации ВЖС 0,2 г/л. Отличие методики заключалось в том, что при достижении в камере ВВТ удельной оптической плотности 7,5 дБ/м ультразвуковой генератор продолжал работать еще 5 мин до его выключения, после чего начинались измерения. В остальном схема проведения измерений не отличалась от предыдущих опытов.

Из полученных результатов, приведенных на графике 4 рис. 2, следует, что увеличение времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере перед началом измерения оптической плотности приводит к заметному росту устойчивости ВВТ. Время двукратного уменьшения удельной оптической плотности (от 7,5 до 3,75 дБ/м) выросло примерно в 2,3 раза по сравнению с водой — от 33 (график 1) до 77 с (график 4). Этот эффект может быть объяснен накоплением в объеме камеры капель ВВТ, на которых уже полностью сформировался конденсированный монослой ВЖС.

Пояснить указанный эффект можно следующим образом. В процессе переконденсации при исходной концентрации ВЖС в воде 0,2 г/л мелкие капли до образования монослоя уменьшаются в диаметре в ~1,3 раза [12], что, исходя из геометрических соображений, соответствует снижению объема и массы капель в 2,2 раза — 1,33. После этого происходит резкое уменьшение скорости испарения за счет образования монослоя ВЖС.

Следовательно, торможение процесса переконденсации происходит спустя некоторое время, в течение которого исходные капли ВВТ претерпевают значительные изменения: мелкие быстро уменьшаются, крупные увеличиваются. Большие капли — на их поверхности в тот же момент конденсируются пары воды — растут беспрепятственно, т. к. монослой ВЖС при разбавлении капли образоваться не может.

Величина указанных изменений находится в обратной зависимости как от исходной концентрации ВЖС, так и от исходного диаметра капель ВВТ, т. к. отношение объема и, следовательно, количества ВЖС к площади поверхности сферической капли — величина прямо пропорциональная диаметру капли.

Таким образом, увеличение времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере при 100 % относительной влажности и в присутствии ВЖС с концентрацией, недостаточной для образования монослоя на исходных каплях, приводит к ускоренному выводу крупных капель из объема ВВТ за счет седиментации и гравитационной коалесценции. Одновременно повышается концентрация мелких капель в ВВТ как за счет переконденсации, так и за счет продолжающего работать ультразвукового генератора.

Описанный механизм повышения устойчивости ВВТ может иметь большое значение при реализации объемного тушения, т. к. после достижения и превышения тушащей концентрации ВВТ необходимо поддерживать концентрацию на необходимом уровне еще некоторое время [5].

Результаты проведенных экспериментов позволяют заключить, что существенное повышение концентрации распыляемой эмульсии ВЖС может оказаться достаточно

для образования монослоя уже на исходных каплях ВВТ.

Как было показано выше, распыление более концентрированной эмульсии ВЖС при используемой частоте ультразвуковых колебаний невозможно из-за высокой вязкости эмульсии. В свою очередь, повышение температуры распыляемой эмульсии для снижения вязкости не должно приводить к плавлению ВЖС, при котором монослой разрушается.

Предполагается, что дальнейший поиск и исследование амфифильных органических соединений, образующих монослой на поверхности воды и при этом обладающих повышенной температурой плавления, позволит создать особо устойчивый плотный ультразвуковой ВВТ для объемного пожаротушения.

Полученные результаты могут послужить основой для постановки в дальнейшем более обширных и детальных исследований по увеличению устойчивости высококонцентрированных ВВТ для целей пожаротушения.

Выводы

Из анализа научных работ по применению ультразвукового ВВТ для объемного пожаротушения и повышению его устойчивости сделан вывод об актуальности проведения исследований по влиянию монослоя ВЖС на устойчивость макрообъемов высококонцентрированного ВВТ. Повышение устойчивости плотных ВВТ является одним из ключевых факторов в развитии новейшей технологии объемного водяного пожаротушения.

Для исследования устойчивости плотного ВВТ, генерируемого ультразвуковым распылителем, был создан испытательный

стенд, с помощью которого проведены эксперименты по определению изменения оптической плотности ВВТ во времени при 100 % относительной влажности в испытательной камере.

Проведено определение удельной оптической плотности ВВТ в зависимости от времени эксперимента при миллипроцентных концентрациях ВЖС в специально приготовленных устойчивых водных эмульсиях, которые диспергировались ультразвуковым генератором. При увеличении концентрации ВЖС и времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере устойчивость плотного ВВТ увеличивается за счет образования монослоя на поверхности капель.

Проведен анализ возможных механизмов увеличения устойчивости ВВТ при увеличении времени поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере, на основании чего сделан вывод о заметном вкладе инерционности и первоначального быстрого испарения наиболее мелких капель в процессы переконденсации. Предложенный механизм повышения устойчивости ВВТ может сыграть важную роль в совершенствовании технологий объемного тушения.

Было обнаружено, что распыление эмульсии с концентрацией ВЖС выше ~0,25 г/л при используемой частоте ультразвуковых колебаний трудноосуществимо из-за ее высокой вязкости и относительно низкой температуры плавления ВЖС, превышение которой при распылении препятствует образованию монослоя.

В ходе экспериментов было установлено, что вопреки ожиданиям возможные для применения концентрации ВЖС в воде не позволили получить многократного уве-

личения устойчивости ВВТ. Максимальное увеличение устойчивости по сравнению с водой составило примерно 2,3 раза. Указанный результат объясняется тем, что еще до образования монослоя исходные капли ВВТ претерпевают значительные изменения: мелкие быстро уменьшаются, крупные увеличиваются.

Ожидается, что продолжение поиска и изучения амфифильных органических соединений, формирующих монослой на поверхности воды и обладающих повышенной температурой плавления, позволит разработать особенно устойчивый и плотный ультразвуковой туман для объемного пожаротушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 3. С. 60–69.
2. Murugan S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // Archives of Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 83 (2). pp. 74–78.
3. Мальгин Ю. В. Увлажнение воздуха туманом (теория и практика на примере ультразвукового увлажнителя) // С.О.К. 2007. № 10. С. 91–98.
4. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization / A. Lozano et al. // ILASS2017. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>.
5. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Долгопериодические автоколебательные процессы при тушении пламени высокодисперсным водяным туманом // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 37–48.
6. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultra-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.
7. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments / A. Awtry et al. // Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico May 4–6, 2004.
8. Hydrogen cloud explosion suppression by micron-size water mist / L. Yanchao et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47 (55). pp. 23462–23470.
9. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
10. Miles R., Davies J., Reid J. The influence of the surface composition of mixed monolayer films on the evaporation coefficient of water // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
11. Frank E. Evaporation of water: with emphasis on applications and measurements. New York : CRC Press, 2018. 188 p.
12. Influence of organic films on the evaporation and condensation of water in aerosol / J. Davies et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
13. Измеритель оптической плотности дыма «ИОПД-5М» // СПЭК : сайт. URL: <http://spec.ru/products/id/143> (дата обращения: 12.02.2025).

14. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // *Nature*. 1958. Vol. 182. P. 1724.
15. Зависимости для оценки дальности видимости в аэрозольных средах / Д. С. Фёдоров [и др.] // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2019. № 9–10 (135–136). С. 105–110.

REFERENCES

1. Features of fire extinguishing in a closed volume with fine spray water / A. L. Dushkin et al. // *Pozharovzryvzodobezopasnost*. 2017. № 3. pp. 60–69.
2. Murugan S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 83 (2). pp. 74–78.
3. Malgin Yu. V. Air humidification by fog (theory and practice on the example of an ultrasonic humidifier) // *S.O.K.* 2007. № 10. pp. 91–98.
4. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization / A. Lozano et al. // *ILASS2017*. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>.
5. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Long-periodic auto-oscillatory processes during flame extinguishing by a highly dispersed water mist // *Technospheric safety*. 2023. № 4 (41). pp. 37–48.
6. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultral-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.
7. Measurement of absolute oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in very fine water mist / A. Awtry et al. // *Halon Options Technical Working Conference*, Albuquerque, New Mexico, May 4–6, 2004.
8. Suppression of hydrogen cloud explosion by micron-sized water mist / L. Yanchao et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47 (55). pp. 23462–23470.
9. Malgin Yu. V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier // *S.O.K.* 2020. № 3. pp. 56–59.
10. Miles R., Davies J., Reid J. Influence of the surface composition of mixed monolayer films on the water evaporation coefficient // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
11. Frank E. *Evaporation of water: with emphasis on applications and measurements*. New York : CRC Press, 2018. 188 p.
12. Effect of organic films on water evaporation and condensation in aerosol / J. Davies et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
13. Smoke optical density meter “IOPD-5M” // *SPEK* : website. URL: <http://spec.ru/products/id/143> (date of application: 12.02.2025).
14. Eisner H., Brooks F., Quince B. Stabilization of water fogs // *Nature*. 1958. Vol. 182. P. 1724.
15. Dependencies for estimating the visibility range in aerosol environments / D. S. Fedorov et al. // *Defense Engineering Issues. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2019. № 9–10 (135–136). pp. 105–110.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пахомов Георгий Борисович, канд. хим. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доц., заместитель начальника института по научной работе Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459; e-mail: elfimovamv@uigps.ru

Тужиков Евгений Николаевич, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России, Россия (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 759898; e-mail: tujikoven@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of Research of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459; e-mail: elfimovamv@uigps.ru

Evgenij N. Tuzhikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency and Rescue Equipment of Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 759898; e-mail: tujikoven@uigps.ru

Поступила в редакцию 17.02.2025
Одобрено после рецензирования 20.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 614.841.33

ПРОБЛЕМЫ ОТСУТСТВИЯ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ЧАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ

Григорьев Денис Юрьевич, Плешаков Виталий Владимирович, Уваров Игорь Александрович,
Хохлова Алла Юрьевна
Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена проблеме отсутствия проектной документации на эксплуатируемом объекте защиты, ввиду чего собственник (руководитель) не имеет перечня обязательных требований пожарной безопасности, предъявляемых к такому объекту. Следовательно, эксплуатация объекта защиты становится небезопасной, что в итоге приводит к административным правонарушениям, а в случае возникновения пожароопасной ситуации с причинением вреда охраняемым законом ценностям — и к уголовной ответственности. По своей сути, отсутствие проектной документации свидетельствует о том, что на объекте нет системы обеспечения пожарной безопасности. Целью статьи является совершенствование системы обеспечения пожарной безопасности эксплуатируемого объекта защиты. Задачей исследования стали анализ проблемной ситуации и поиск возможных решений. Научной основой исследования послужили теория системного анализа и методы информационного синтеза.

В ходе исследования был установлен ряд требований нормативных правовых актов, обязывающих осуществлять эксплуатацию на основе проектной документации, а в случае внесения изменений в объект защиты — необходимую корректировку. Однако на большом количестве объектов такой документации нет. В статье описаны причины отсутствия проектной документации, а также установлены неблагоприятные последствия, к которым это может привести. Если же в ходе эксплуатации объекта защиты выясняется, что проектная документация была утрачена, то ее необходимо восстановить. В работе было предложено два основных пути восстановления проектной документации, способ, позволяющий доказать факт наличия или отсутствия изменений на объекте защиты, а также дополнения в нормативные правовые акты Российской Федерации, необходимые для исключения самовольных изменений на объекте защиты.

Проведенный анализ позволил выявить проблемные вопросы, связанные с отсутствием проектной документации. Были установлены нормативные требования к наличию проектной документации на объекте защиты. Благодаря выводам из анализа удалось определить пути восстановления проектной документации, а также разработать дополнения (изменения) в нормативные правовые акты РФ, позволяющие исключить рассматриваемую проблему в будущем.

Результаты статьи должны применяться собственниками, лицами, распоряжающимися имуществом на законном основании при эксплуатации объекта защиты, и контрольными

(надзорными) органами, в т. ч. органами государственного пожарного надзора, при проведении контрольных (надзорных) и профилактических мероприятий.

Ключевые слова: реконструкция, капитальный ремонт, техническое перевооружение, изменение класса функциональной пожарной опасности, перепланировка, система обеспечения пожарной безопасности, мероприятия по обеспечению пожарной безопасности, государственный пожарный надзор, требования пожарной безопасности

Для цитирования: Проблемы отсутствия проектной документации в части обеспечения пожарной безопасности эксплуатируемого объекта защиты / Д. Ю. Григорьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 90–107.

THE PROBLEMS OF LACK OF PROJECT DOCUMENTATION IN TERMS OF ENSURING FIRE SAFETY OF THE OPERATED PROTECTION FACILITY

Denis Yu. Grigoriev, Vitaly V. Pleshakov, Igor A. Uvarov, Alla Yu. Khokhlova
The Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of lack of project documentation in terms of ensuring fire safety of the operated protection facility, which means the owner (manager) does not have a list of mandatory fire safety requirements for such a facility. Thus, the operation of the protected facility becomes unsafe, which finally leads to administrative offenses, and in case of a fire hazard situation with damage to legally protected values, and to criminal liability. In fact, the lack of project documentation indicates that there is no fire safety system at the facility. The purpose of the article is to improve the fire safety system of the operated protection facility. The objective of the study is to analyze the problem situation and find the possible solutions. The scientific basis of the research is the theory of system analysis and methods of information synthesis.

During the study, a number of requirements of regulatory legal acts were established that oblige the operation to be carried out on the basis of project documentation, and in case of changes to the protection facility, make the necessary adjustments. However, there is no such documentation for a large number of objects. The article describes the reasons for the lack of project documentation, and also establishes adverse consequences that this may lead to. If, during the operation of the protection facility, it is found out that the project documentation was lost, then it must be restored. The work proposes two main ways to restore project documentation, a method that allows proving the fact of the presence or absence of changes at the protection facility, as well as additions to the regulatory legal acts of the Russian Federation necessary to exclude unauthorized changes at the protection facility.

The conducted analysis allowed to identify problematic issues related to the lack of project documentation. Regulatory requirements for the availability of project documentation at the protected facility were established. Thanks to the conclusions from the analysis, it was possible to determine ways to restore project documentation, as well as to develop additions (amendments) to the regulatory legal acts of the Russian Federation, allowing to exclude the problem under consideration in the future.

The results of the article should be applied by owners, persons disposing of property on a legal basis during the operation of the protection facility, and control (supervisory) authorities, including state fire supervision authorities, during control (supervisory) and preventive measures.

Keywords: reconstruction, major repairs, technical re-equipment, modification of the functional fire hazard class, redevelopment, fire safety system, fire safety measures, state fire supervision, fire safety requirements

For Citation: The problems of lack of project documentation in terms of ensuring fire safety of the operated protection facility / D. Yu. Grigoriev et al. // *Technospheric safety*. 2025. № 1 (46). pp. 89–106.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В практической деятельности органы государственного пожарного надзора (далее — органы ГПН) все чаще встречаются с проблемой отсутствия проектной документации (далее — ПД) на объектах защиты. Подобная ситуация является проблемой для широкого круга участников жизненного цикла объекта защиты: инспекторов ГПН, собственников, арендаторов, обслуживающих организаций. Так, согласно Докладу с обобщением правоприменительной практики и руководству по соблюдению обязательных требований МЧС России от 24.04.2024, к основным причинам нарушений требований пожарной безопасности (далее — ТПБ) относятся: незнание обязательных требований, низкая личная ответственность, преследование экономической выгоды.

Одной из основных целей разработки ПД является формирование перечня обязательных требований. В части обеспечения ТПБ таким перечнем является раздел «Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности» (далее — МОПБ) в соответствии с п. 26 постановления Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (тестовая и графическая

части). Наличие МОПБ и соответствие объекта защиты принятым в нем проектным решениям свидетельствуют о наличии системы обеспечения пожарной безопасности, требуемой для каждого объекта защиты в соответствии со ст. 5 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — № 123-ФЗ), что подтверждается в Информационном письме МЧС России от 14.10.2024 № 43-6533-19.

Требования по применению ПД в качестве основополагающего документа на всех стадиях жизненного цикла объекта защиты предусмотрены целым рядом нормативных правовых актов РФ:

- эксплуатации здания в соответствии с ПД: ст. 5.2, ст. 48, ч. 5, ст. 55.24, 55.25 Градостроительного кодекса РФ (далее — ГрК РФ) от 29.12.2004 № 190-ФЗ (далее — № 190-ФЗ);
- ПД должна использоваться в качестве основного документа, в т. ч. при эксплуатации: ч. 10, ст. 15 Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (далее — № 384-ФЗ), ст. 5.1 Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (далее — № 184-ФЗ);

- оценка соответствия зданий и сооружений осуществляется в соответствии с ПД: ст. 40 № 384-ФЗ, ст. 5.1 № 184-ФЗ;
- категория по пожарной опасности, степень огнестойкости, класс функциональной и конструктивной пожарной опасности устанавливаются согласно ПД: ст. 24, 27, 28, 32 № 123-ФЗ;
- автоматические установки пожаротушения и пожарной сигнализации должны монтироваться в зданиях и сооружениях в соответствии с ПД: ст. 83 № 123-ФЗ;
- эксплуатация здания в соответствии с ПД: п. 2 (1) Правил противопожарного режима в РФ, утвержденных постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» (далее — ППР № 1479);
- использовать подвальные и цокольные этажи для организации детского досуга в соответствии с ПД: п. 8 ППР № 1479;
- оценка пределов огнестойкости, огнезащитного покрытия осуществляется в соответствии с ПД: п. 13 ППР № 1479;
- запреты на изменение системы противопожарной защиты осуществляются только на основе ПД: п. 16 ППР № 1479;
- эксплуатация средств обеспечения пожарной безопасности в соответствии с проектными решениями: п. 54 ППР № 1479;
- а также другие требования и запреты: см. п. 23, 33, 117, 133, 209, 315, 319, 323, 334, 383, 388, 389 ППР № 1479.

Таким образом, на объекте защиты должна находиться ПД (не считая рабочей и исполнительной документации) в части обеспечения пожарной безопасности, в т. ч. разделы:

- мероприятия по обеспечению пожарной безопасности;

- система пожарной сигнализации;
- система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;
- система противопожарной автоматики;
- система автоматической установки пожаротушения;
- система внутреннего противопожарного водопровода;
- система противодымной защиты;
- специальные технические условия (если разрабатывались): см. Информационное письмо МЧС России от 04.02.2025 № М-АМ-27;
- стандарт организации (если разрабатывался): см. Информационное письмо МЧС России от 04.02.2025 № М-АМ-27;
- расчет пожарного риска (если разрабатывался): см. Информационное письмо МЧС России от 04.02.2025 № М-АМ-27;
- анализ предварительного планирования действий пожарных подразделений (если разрабатывался);
- отчеты о теплотехнических расчетах, исследованиях и испытаниях (если разрабатывались) и другие расчеты: см. Информационное письмо МЧС России от 04.02.2025 № М-АМ-27.

Следует отметить, что самостоятельный раздел МОПБ появился в составе ПД только с 2008 г., до этого описание соблюдения ТПБ содержалось в смежных разделах.

Несмотря на требования по наличию и применению в практической деятельности ПД, в большинстве случаев на объектах защиты она отсутствует. Авторами статьи произведена попытка разобраться, в чем же заключается обозначенная проблема и к каким последствиям она может привести.

В ходе работы над статьей была проанализирована литература. В исследовании [1]

отмечается проблема отсутствия на объекте актуальной, достоверной и полной информации, т. к. ПД либо устарела, либо частична, либо ее вообще нет. Отсутствие ПД не позволяет создать нормальные условия эксплуатации, провести эксплуатационный контроль и тем более сделать вывод о безопасности здания, поскольку невозможно оценить соответствие фактических параметров и характеристик объекта защиты проектным [2] (ст. 2, 5, 15 № 384-ФЗ, ст. 55.24 № 190-ФЗ). Авторы исследования [3] также считают, что на объекте важнейшей задачей является контроль за выполнением требований, заложенных в ПД, которая была утверждена во время прохождения экспертизы и реализована в процессе строительства.

В случае отсутствия ПД инспектор ГПН вынужден самостоятельно установить пожарно-технические характеристики, в т. ч. степень огнестойкости и класс функциональной пожарной опасности, перечень обязательных ТПБ с учетом даты ввода объекта в эксплуатацию (ч. 4 ст. 4 № 123-ФЗ), а также провести оценку их соответствия (ст. 6 Федерального закона от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности», п. 2 Положения о федеральном государственном пожарном надзоре, утвержденного постановлением Правительства РФ от 12.04.2012 № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре» (далее — ПП № 290), ввиду чего количество выявленных нарушений, в т. ч. капитального характера [4]), может стать значительно большим по сравнению с объектом, на котором имеется ПД с обоснованием всех принятых решений [5].

Со стороны следственных органов по результатам пожаров на объектах, для которых отсутствует ПД, достаточно легко обосновать состав преступления, имея

огромное разнообразие в выборе возможных нарушенных требований (объект преступления) [6], для привлечения субъекта преступления к ответственности независимо от наличия или отсутствия причинной связи такого нарушения и наступивших последствий [7]. Таким образом, отсутствие ПД на объекте защиты, на котором произошел пожар с последствиями (гибель, травматизм, уничтожение чужого имущества), предусмотренными ст. 168, ст. 219, ст. 238 Уголовным кодексом РФ (далее — УК РФ), делает доказательство невиновности руководителя организации, а также невиновности инспектора ГПН в выявлении обязательного нарушения ТПБ, что квалифицируется ст. 293 «Халатность» УК РФ, весьма сложной задачей, даже если наступление таких последствий не связано с имеющимся нарушением ТПБ, содержащихся в нормативных документах по пожарной безопасности.

Из выше представленного следует, что проблема отсутствия ПД заключается в невозможности эффективной эксплуатации объекта защиты, поддержания его надежности и безопасности, что, в свою очередь, приводит:

- к увеличению нарушений требований пожарной безопасности;
- риску гибели и травматизма людей в случае пожара;
- риску уничтожения или повреждения чужого имущества;
- привлечению собственников, арендаторов, обслуживающих организаций к административной и уголовной ответственности за причинение вреда охраняемым законом ценностям;
- привлечению инспектора ГПН к уголовной ответственности по ст. 293 УК РФ «Халатность».

ПД на объекты защиты начала разрабатываться с 1938 г. в соответствии с постановлением СНК СССР от 26.02.1938 № 233 «Об улучшении проектного и сметного дела и об упорядочении финансирования строительства», вместе с тем стали появляться первые нормативные требования в области пожарной безопасности [8]. Далее вводились документы, содержащие состав проектов, в т. ч. с ТПБ, а именно:

- «Инструкция по составлению проектов и смет по промышленному и жилищно-гражданскому строительству», утвержденная постановлением Совета Министров СССР от 26.01.1952 № 486;
- «Инструкция по составлению проектов и смет по промышленному и жилищно-гражданскому строительству (И 112-56), утвержденная Госстроем СССР 05.05.1956;
- «Инструкция по составлению типовых проектов и их применению в строительстве» (И 118-56), утвержденная Госстроем СССР 16.08.1956;
- «Инструкция по составлению проектов планировки и застройки городов» (СН 345-66), утвержденная Госстроем СССР 23.03.1966;
- «Временная инструкция по разработке проектов и смет для жилищно-гражданского строительства» (СН 401-69), утвержденная Госстроем СССР 19.12.1969;
- «Инструкция по разработке проектов и смет для промышленного строительства» (СН 202-76), утвержденная Госстроем СССР 16.03.1976;
- «Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектов и смет на строительство предприятия, здания и сооружения» (СН 202-81), утвержденная Госстроем СССР 29.12.1981;
- «Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятия, здания и сооружения» (СНиП 1.02.01-85), утвержденная Госстроем СССР 23.12.1985.

Несмотря на вышеизложенное, в практической деятельности на большинстве объектов ПД отсутствует, вследствие чего возникает вопрос о причинах такого положения.

Объекты защиты эксплуатируются достаточно продолжительное время. Согласно приложению № 7 к Методическим указаниям, утвержденным приказом Минэкономразвития России от 07.06.2016 № 358 «Об утверждении Методических указаний о государственной кадастровой оценке», срок службы объектов защиты варьируется в пределах от 50 лет (для деревянных зданий), 80 лет (объектов массового строительства: жилых, общественных, производственных), до 100 лет (для уникальных зданий). За этот период происходят различные события и изменения, в т. ч. смена собственников, появление арендаторов, реконструкция, капитальный ремонт, техническое перевооружение, изменение функционального назначения здания и т. д. Объект защиты — это живой организм, и ему свойственны такие изменения, проводимые в т. ч. с целью повышения рентабельности. Так, в исследовании [9] имеются сведения о том, что для старых зданий (возрастом более 25 лет) осуществляется изменение функционального назначения из-за неудовлетворения практической потребности. В исследовании [10] говорится, что руководитель организации проводит реконструкцию объекта с целью повышения экономической эффективности. Из работы [11] следует, что реконструкция — это процесс (комплекс работ) улучшения тех-

нико-экономических показателей, направленных на повышение эксплуатационной безопасности существующих зданий. В исследовании [12] приводится пример того, как при эксплуатации складского здания с 1869 г. оно преобразуется в производственное, а в настоящее время — в офисное. Авторы указанного исследования подчеркивают то, что прежде, чем осуществлять работы по реконструкции, необходимо подготовить ПД и пройти ее согласование. Если такая работа не осуществляется, то в процессе контрольных (надзорных) мероприятий выявляются нарушения как противопожарного режима, так и капитального характера, что является основной причиной так называемой высокой административной нагрузки [13]. Согласно анализу нарушений ТПБ [14], выявленных после ввода объектов в эксплуатацию (в период с 01.01.2007 до 01.09.2023), было установлено, что количество нарушений капитального характера превышает 22 тыс. на более 40 тыс. объектах защиты, что свидетельствует о наличии изменений, проводимых без корректировки/разработки ПД.

Основных причин отсутствия ПД может быть несколько:

- отсутствие передачи ПД от застройщика или от собственника другому собственнику;
- потеря ПД на стадии эксплуатации;
- повреждение ПД;
- потеря ПД в процессе изменения формы собственности (от государственной к частной) совместно с ее утратой в архивах (времена «перестройки»);
- умышленная утрата документации ввиду большого количества изменений на объекте защиты, осуществляемых самовольно [15], без внесения необходимых изменений в ПД;
- и др.

Следовательно, исходя из сделанного вывода, а также согласно Информационному письму Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 18.04.2023 № 10916-ОГ/08, в случае отсутствия ПД на объекте защиты эксплуатирующая организация (руководитель организации) должна принять все меры по ее восстановлению. Порядок этой процедуры законодательством не предусмотрен, однако можно выделить три основных пути решения указанной проблемы:

- формирование запроса о наличии ПД в экспертизу, в которой рассматривались проектные решения;
- формирование запроса о наличии ПД в архивах (в организациях-застройщиках/заказчиках; в организациях-разработчиках; в организациях, утверждающих, согласовывающих документы, лицензирующих, экспертных; организациях и ведомствах, не являющихся застройщиками; в организациях-исполнителях работ; в эксплуатирующих организациях; в контрольных и надзорных организациях, согласно п. 571 раздела 6 приказа Росархива от 28.12.2021 № 142 «Об утверждении Перечня типовых архивных документов, образующихся в научно-технической и производственной деятельности организаций, с указанием сроков хранения»);
- восстановление через стадии проектирования согласно № 190-ФЗ.

Предложить общие правила для всех эксплуатируемых объектов защиты достаточно проблематично, ввиду чего условно разделим их в зависимости от периодов (эпох) нормативного правового регулирования в рассматриваемой сфере:

- 1) объекты, введенные в эксплуатацию с 1939–1951 гг.;

- 2) с 1952–1955 гг.;
- 3) с 1955–1962 гг.;
- 4) с 1962–1970 гг.;
- 5) с 1970–1979 гг.;
- 6) с 1980–1984 гг.;
- 7) с 1986–2008 гг.;
- 8) с 1986–2009 гг.;
- 9) с 2010–2020 гг.;
- 10) с 2021 г. по настоящее время.

Проблема восстановления ПД отсутствует на объектах защиты, у которых есть сведения о ее наличии в архивах (при условии, что у запрашиваемого есть доступ к таким сведениям и ПД действительно сохранилась в архиве) и при эксплуатации которых изменения не производились [16]. С 2010 г. хранение ПД предусмотрено согласно ГОСТ Р 21.1003–2009 «Система проектной документации для строительства (СПДС). Учет и хранение проектной документации», следовательно, для объектов 9, 10 эпох восстановление ПД не является проблемой, однако для остальных объектов вопрос остается открытым.

ГрК РФ (№ 190-ФЗ) предусматривает три стадии проектирования объектов:

- 1) строительство — создание зданий, строений, сооружений, в т. ч. на месте сносимых объектов капитального строительства (п. 13 ст. 1 № 190-ФЗ);
- 2) реконструкция объектов капитального строительства — изменение параметров объекта капитального строительства, его частей (высоты, количества этажей, площади, объема), в т. ч. надстройка, перестройка, расширение объекта капитального строительства, а также замена и (или) восстановление несущих строительных конструкций объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов таких кон-

струкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы и (или) восстановления указанных элементов (п. 14 ст. 1 № 190-ФЗ);

- 3) капитальный ремонт объектов капитального строительства — замена и (или) восстановление строительных конструкций объектов капитального строительства или элементов таких конструкций, за исключением несущих строительных конструкций, замена и (или) восстановление систем инженерно-технического обеспечения и сетей инженерно-технического обеспечения объектов капитального строительства или их элементов, а также замена отдельных элементов несущих строительных конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы и (или) восстановление указанных элементов (п. 14.2 ст. 1 № 190-ФЗ).

Авторы настоящей статьи также обращают внимание на наличие слова «перестройка» в определении термина «реконструкция». Согласно п. 3.6 МДС 81-35.2004 «Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации», к перестройке можно отнести усиление несущих конструкций, замену перекрытий, изменение планировки существующих зданий и сооружений, а также другие мероприятия. Таким образом, перепланировка, затрагивающая эвакуационные пути и выходы, также может стать основанием для реконструкции.

Из представленного выше следует, что в случае отсутствия ПД, разработанной на стадии капитального строительства, возможно ее восстановить в рамках реконструкции и (или) капитального ремонта.

Однако к указанным стадиям проектирования, предусмотренным № 190-ФЗ, необходимо добавить ситуации, при которых также возникает необходимость внесения изменений в ПД согласно № 123-ФЗ:

- техническое перевооружение (ч. 4, ст. 4 № 123-ФЗ);
- изменение класса функциональной пожарной опасности объекта защиты (ст. 80 № 123-ФЗ).

Анализ нормативной базы показал, что четкая связь между стадиями, предусмотренными № 190-ФЗ и №123-ФЗ, не установлена, однако в случаях технического перевооружения [17] и (или) изменения функционального назначения возникает необходимость в проведении реконструкции и (или) капитального ремонта с целью внесения необходимых изменений в соответствующие разделы ПД [18] для возможности дальнейшей безопасной эксплуатации объекта защиты согласно рассмотренным

ранее требованиям. Если такие изменения были произведены без разработки (корректировки) ПД, то проблемы, возникающие при отсутствии ПД (рассмотренные ранее), остаются нерешенными.

Таким образом, при восстановлении ПД объектов защиты, по результатам анализа фактического состояния которых будут выявлены признаки реконструкции, эксплуатирующая организация (руководитель организации) должна произвести подготовку ПД по стадии реконструкции. Если по результатам анализа признаков реконструкции не выявлено, то ПД составляется на стадию капитального ремонта, в т. ч. при изменении функционального назначения объекта защиты (Письмо ФГБУ ВНИИПО МЧС России от 03.11.2020 № ИГ-117-1885-13-4) и (или) техническом перевооружении.

Процессы проектирования для различных стадий и объектов отличаются, что показано на рис. 1 и рис. 2.

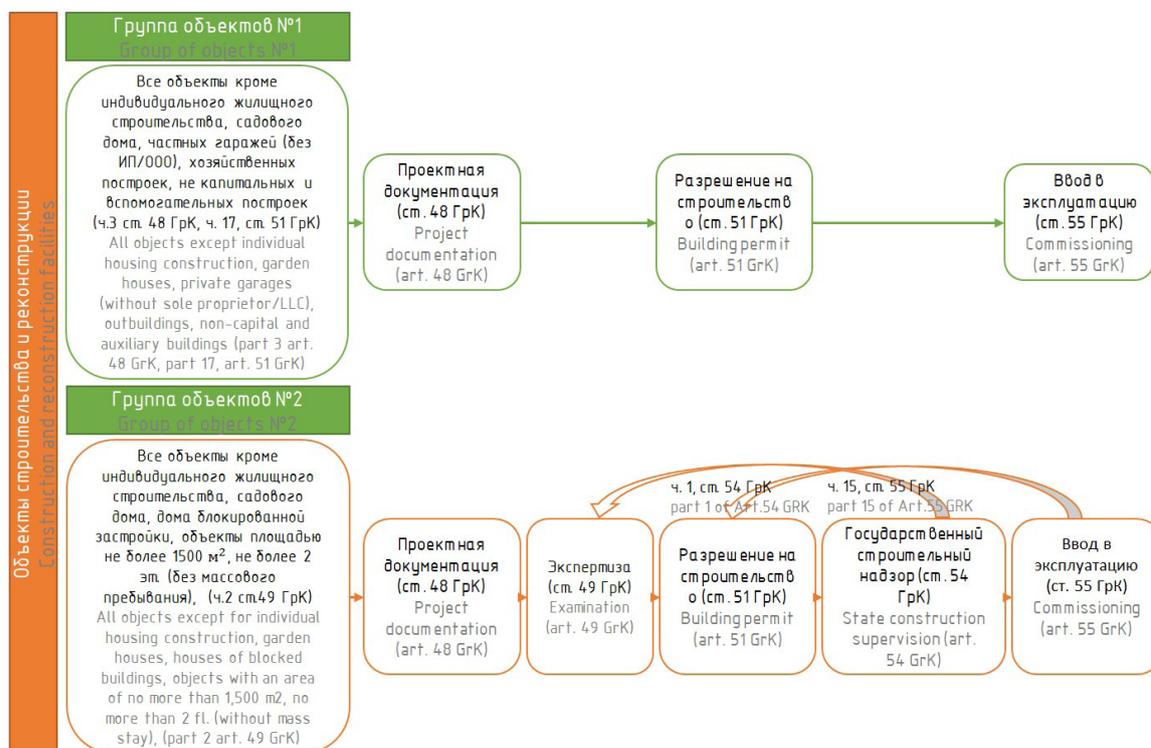


Рис. 1. Схема процессов проектирования объектов строительства и реконструкции

Fig. 1. Diagram of the design processes of construction and reconstruction facilities



Рис. 2. Схема процессов проектирования объектов капитального ремонта

Fig. 2. The scheme of the processes of designing capital repair facilities

Условно можно выделить три группы объектов проектирования. Первые две относятся к строительству и реконструкции, а третья — к капитальному ремонту. Из рис. 1 видно, что все объекты, за исключением указанных в группах 1, 2, должны иметь ПД. Основное отличие между ними заключается в наличии/отсутствии этапов экспертизы ПД и прохождения государственного строительного надзора.

Наиболее простой стадией проектирования с точки зрения восстановления ПД является капитальный ремонт. Капитальный ремонт позволяет застройщику по собственной инициативе разработать ПД с целью ее восстановления. На указанной стадии не требуется прохождения экспертизы, а также получение разрешения на строительство, что позволяет с наименьшими затратами ресурсов восстановить ПД. Однако на этом пути возникают другие проблемы. Во-первых, в случае, если проект восстанавливается без согласования с экспертными организациями, его качество, а также полнота учета всего перечня обязательных требований для конкретного объекта защиты могут быть невысокими. Во-вторых, в случае, если ПД на восстановление будет проходить экспертизу, эксперт потребует выполнение всех решений по новым нормативным документам, т. к. установить

конкретный перечень внесенных изменений ввиду отсутствия изначального проекта не представляется возможным. Кроме того, сама эксплуатирующая организация может не знать о количестве внесенных изменений в объект защиты, если осуществлялась смена собственности.

Для установления наличия изменений на объекте защиты или для подтверждения, что изменений с момента ввода его в эксплуатацию не проводилось, может использоваться информация, содержащаяся в бюро технической инвентаризации (далее — БТИ). Создание БТИ было предусмотрено в соответствии с постановлением Экономического Совета РСФСР «Об инвентаризации имущества местных Советов» 27.05.1927 (далее — Постановление БТИ) [19]. Таким образом возможно получить сведения для объектов, входящих в 1–8 эпохи, рассмотренные выше. Согласно положению к Постановлению БТИ, в отношении зданий указывались сведения по их назначению, материалу стен и крыш, размерам (числу этажей, объему, площади), роду отделки, системе отопления, году постройки, техническому состоянию, проценту изношенности, отметке об условиях эксплуатации в прошлом, а также составлялся графический план. Сведения, содержащиеся в БТИ, не только позволяют установить факт наличия изменений, но и могут

являться доказательством наличия или отсутствия изменений объекта защиты в части реконструкции, капитального ремонта, технического перевооружения, функционального назначения, перепланировки, что необходимо в случае судебных разбирательств [20]. Следовательно, если на объекте защиты изменения не проводились, что подтверждается изначальным документом БТИ, то восстановление ПД через процедуру капитального ремонта становится возможным. В случае, если изменения были произведены, в т. ч. техническое перевооружение, перепланировка, затрагивающая эвакуационные пути и выходы, изменение функционального назначения, может возникнуть необходимость в осуществлении реконструкции. Такая же логика будет прослеживаться в ходе судебных разбирательств, т. к. факт отсутствия ПД сам по себе будет нести угрозу причинения вреда охраняемым законом ценностям [21]. В рамках контрольно-надзорной деятельности инспектор ГПН вправе потребовать возвращение объекта к первоначальному виду, предусмотренному документами БТИ с сопутствующей ПД, или предъявить полный перечень нарушений ТПБ относительно действующей на момент контрольного (надзорного) мероприятия нормативной базы.

Проведенное авторами статьи исследование позволяет упростить эксплуатирующим организациям работу по восстановлению утраченной ПД в части обеспечения пожарной безопасности и продолжить эксплуатацию объекта на основе выполнения перечня обязательных ТПБ, изложенных в МОПБ. Таким образом, наличие ПД на объекте защиты может считаться признаком добросовестности контролируемого лица и стимулироваться путем внедрения

дополнительного критерия в систему определения категории риска объекта защиты, позволяющего перейти к более низкой категории (ст. 8, 23, 45, 48 Федерального закона от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации»).

Отдельно стоит упомянуть о том, что ПД является источником информации при разработке декларации о пожарной безопасности (ст. 64 № 123-ФЗ), а в случае ее отсутствия составление декларации для собственников объектов становится весьма проблематичной задачей.

Несмотря на возможность восстановления ПД, нераскрытым остается вопрос последующего контроля за соблюдением контролируемым лицом обязательных ТПБ, в т. ч. заложенных в МОПБ, а также предупреждение/пресечение самовольных изменений, вносимых контролируемым лицом без соответствующей корректировки ПД. Для обеспечения указанного контроля, а также для уточнения отдельных положений нормативных правовых актов авторы настоящей статьи предлагают внести следующие дополнения.

- Ст. 2 № 123-ФЗ. Дополнить понятием «перепланировка» по аналогии со ст. 25 Жилищного кодекса РФ от 29.12.2004 № 188-ФЗ, где перепланировка — это изменение границ и (или) площади такого помещения, и (или) образование новых помещений, и (или) изменение его внутренней планировки (в т. ч. без изменения границ и (или) площади помещения). В результате перепланировки помещения также могут быть изменены границы и (или) площадь смежных помещений. Если перепланировка влечет за собой возникновение изменений и (или) дополнительных ТПБ в части системы про-

тивопожарной защиты, то необходимо внести изменения в ПД.

- Ч. 4, ст. 4 № 123-ФЗ. После слов «на которых были проведены капитальный ремонт, реконструкция» дополнить «изменение класса функциональной пожарной опасности, перепланировка».
- Ч. 1, ст. 5 № 123-ФЗ. Дополнить следующим содержанием: «Форма описания системы обеспечения пожарной безопасности приводится в проектной документации в соответствии с законодательством Российской Федерации о градостроительной деятельности».
- П. 36 (1) ПП № 290. После слов «факта эксплуатации зданий, помещений, сооружений, строительство» дополнить «реконструкция, капитальный ремонт».
- П. 36 (2) ПП № 290. Дополнить: «В случае установления в ходе организации и (или) проведения контрольного (надзорного) мероприятия либо профилактического мероприятия факта эксплуатации зданий, помещений, сооружений, строительство, реконструкция, капитальный ремонт, изменение функционального назначения, техническое перевооружение, перепланировка которых осуществлены без изменений в проектной документации, органом государственного пожарного надзора в течение трех рабочих дней направляется соответствующая информация в органы прокуратуры, органы внутренних дел, органы местного самоуправления для принятия мер в рамках предоставленных полномочий. При этом контрольное (надзорное) мероприятие либо профилактическое мероприятие не проводится, а начатое контрольное (надзорное) мероприятие подлежит прекращению

с составлением акта о невозможности его проведения»;

- Распоряжение Правительства РФ от 19.04.2016 № 724-р «Об утверждении перечня документов и (или) информации, запрашиваемых и получаемых в рамках межведомственного информационного взаимодействия органами государственного контроля (надзора), органами муниципального контроля при организации и проведении проверок от иных государственных органов, органов местного самоуправления либо подведомственных государственным органам или органам местного самоуправления организаций, в распоряжении которых находятся эти документы и (или) информация». Дополнить пунктом «Копии проектной документации на объекты строительства, реконструкции и капитального ремонта», которые находятся в органах местного самоуправления по месту нахождения земельного участка.

Кроме того, для обеспечения деятельности контрольных (надзорных) органов необходима разработка рекомендаций по осуществлению ГПН на объектах, для которых отсутствует ПД.

В ходе проведенного исследования также были выявлены недочеты контроля за соблюдением ТПБ, на которых не проводится экспертиза ПД и государственный строительный надзор, относящихся к группе 1 (согласно рис. 1). Эта проблема требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

Исходя из проведенного исследования следует, что каждый объект защиты, для которого требуется разработка ПД, должен

осуществлять эксплуатацию объекта в соответствии с описанными и обоснованными в ней решениями. Основопологающим документом ПД в части обеспечения пожарной безопасности является раздел МОПБ. Наличие МОПБ и соответствие объекта защиты принятым в нем решениям, эффективным с точки зрения характера и степени влияния на прогнозируемые последствия, свидетельствует о наличии на объекте системы обеспечения пожарной безопасности. При отсутствии ПД она должна быть восстановлена.

В случае, если в процессе эксплуатации не проводились изменения, затрагивающие МОПБ и имеющие критерии реконструкции, ПД может быть восстановлена в рамках ста-

дии капитального ремонта. Для доказательства факта наличия или отсутствия изменений на объекте защиты могут применяться документы БТИ.

Предложены дополнения в действующие нормативно-правовые акты для усиления позиции деятельности надзорных органов ГПН в части последующего пресечения самовольных изменений без корректировки ПД, наличие которой позволит сократить количество нарушений ТПБ, в частности капитального характера, выявляемых в ходе надзорных мероприятий, а также снизить риск наступления неблагоприятных последствий в случае пожара и доказать выполнение требований пожарной безопасности в случае судебных разбирательств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Факторы, ограничивающие применение современных BIM-технологий в проектах реконструкции / Е. М. Коршунова [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 3. С. 53–57. DOI: <https://10.22213/2410-9304-2020-3-53-57>. EDN: YXWIKH.
2. Зайцев В. О., Богданов А. Н. Мониторинг зданий в BIM-комплексах в период эксплуатации, капитального ремонта и реконструкции на примере стадиона «Заря» // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 88–95. EDN: PTVXHE.
3. Нормирование требований пожарной безопасности в области строительства в России / В. Н. Иванов [и др.] // Академия ГПС МЧС России: Теория. Инновации. Практика : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России: в 5 ч. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. Ч. 2. С. 66–70;
4. Григорьев Д. Ю., Давыдов С. С., Хохлова А. Ю. Контрольно-надзорная деятельность в области пожарной безопасности. Проблемы и перспективы // Академия ГПС МЧС России: Теория. Инновации. Практика: материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России, Москва: в 5 ч. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. Ч. 2. С. 41–46. EDN: HDYCDD.
5. Козлачков В. И. К проблеме оценки деятельности органов государственного пожарного надзора // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14, № 2. С. 50–53. EDN: KPNSDF.
6. Козлачков В. И. Проблемы применения требований пожарной безопасности при осуществлении государственного пожарного надзора // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Системы безопасности». 2013. № 22. С. 306–308. EDN: SJMAZP.

7. Правовое регулирование отношений в области применения требований пожарной безопасности при проведении судебных экспертиз по пожарам / В. И. Козлачков [и др.] // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 4 (50). С. 4. EDN: SCCPLL.
8. Проблема изложения требований норм в области пожарной безопасности в России / В. Н. Иванов [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 3. С. 81–88. DOI: <https://10.25257/FE.2024.3.81-88>. EDN: VFQZHX.
9. Чистяков Д. А., Калугин А. Н., Туркина Е. А. Реконструкция зданий в условиях исторической застройки города (на примере реконструкции Политехнического музея в Москве) // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 293–296. EDN: WIOPIU.
10. Боровская К. И., Абакумов Р. Г., Авилова И. П. Оценка экономической эффективности реконструкции зданий нежилого фонда и обзор экономически эффективных типовых строительных технологий при реконструкции // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2018. № 5 (31). С. 10–15. EDN: VAGIGN.
11. Леонова А. Н., Ястремский А. В., Коробов В. С. Понятие «Реконструкция» и основные проблемы, возникающие при реконструкции зданий и сооружений // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. № 4. С. 113–115. EDN: UNUMZG.
12. Тарикулиева М. Я. Реконструкция промышленного завода и замена его функционального назначения под офисы // Человек. Социум. Общество. 2022. № 3. С. 78–83. EDN: DZPBXN.
13. Алехнович А. О., Анучин Л. Л. Оценка и корректировка правоприменительной практики контрольных и надзорных органов: индекс административного давления // Вопросы государственного и муниципального управления. 2021. № 1. С. 7–29. EDN: ONNIEH.
14. Обзор нарушений требований пожарной безопасности, допущенных на этапе проектирования и строительства объектов капитального строительства / И. Б. Счастливый [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России. М. : изд-во Всерос. науч.-исслед. ин-та противопожарной обороны МЧС РФ, 2024. С. 134–138. EDN: DDNGYR.
15. Ющенко Н. А. Гуляев А. Д. Самовольное изменение недвижимого имущества в Российской Федерации (переустройство, перепланировка, реконструкция, смена функционального назначения) // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. № 2 (85). С. 135–144. EDN: CTDWFE.
16. Солдатова О. Н. Использование ретроспективной проектной документации в исторических исследованиях: проблемы и пути решения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Исторические науки. 2023. Т. 5, № 3 (19). С. 100–106. DOI: <https://10.37313/2658-4816-2023-5-3-100-106>. EDN: НКCQKA.
17. Нормативно-технические аспекты состава документации на техническое перевооружение / В. А. Слуцкий [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 2. С. 54–57. EDN: VLYUJJ.
18. Кульчицкий Д. А. Методы реконструкции общественных зданий и сооружений, технические и методологические решения при выборе вида реконструкции // Вестник науки. 2023. Т. 2, № 11 (68). С. 749–758. EDN: RDNCDQ.
19. Шагойко А. С. Анализ особенностей и правовой основы проведения инвентаризации объектов недвижимости // Неделя науки — 2022 : сб. тезисов: в 2 ч. / под ред. Я. А. Асланова,

О. В. Батычко, М. А. Лачугиной, Н. П. Сохиевой ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону : изд-во Южного федерального университета, 2022. Ч. 1. С. 801–803. EDN: VJYDIM.

20. Определение Верховного Суда РФ от 23.03.2017 № 306-КГ17-1633 по делу № А12-16492/2016.

21. Определение Верховного Суда от 29.05.2019 № 302-ЭС19-1733 по делу № А33-14695/2017.

REFERENCES

1. Factors limiting the use of modern BIM-technologies in reconstruction projects / E. M. Korshunova et al. // Intellectual Systems in Production. 2020. Т. 18, № 3. pp. 53–57. DOI: <https://10.22213/2410-9304-2020-3-53-57>. EDN: YXWIKH.

2. Zaitsev, V. O., Bogdanov, A. N. Monitoring of buildings in BIM-complexes during operation, overhaul and reconstruction on the example of the stadium “Zarya” // Izvestiya KGASU. 2020. № 4 (54). pp. 88–95. EDN: PTVXHE.

3. Norming of fire safety requirements in the field of construction in Russia / V. N. Ivanov et al. // Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Theory. Innovations. Practice : Proceedings of the scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia: in 5 p. M. : Academy of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. P. 2. pp. 66–70.

4. Grigoriev D. Yu., Davydov S. S., Khokhlova A. Y. Control and supervisory activity in the field of fire safety. Problems and prospects // Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia: Theory. Innovations. Practice : proceedings of the scientific-practical conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Academy of State Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow: in 5 p. M. : Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2023. P. 2. pp. 41–46. EDN: HDYCDD.

5. Kozlachkov V. I. To the problem of evaluation of activity of state fire supervision bodies // Pozharovzryvozbezopasnost. 2005. Т. 14, № 2. pp. 50–53. EDN: KPNSDF.

6. Kozlachkov V. I. Problems of application of fire safety requirements in the implementation of state fire supervision // Proceedings of the international scientific-technical conf. “Security Systems”. 2013. № 22. pp. 306–308. EDN: SJMAZP.

7. Legal regulation of relations in the field of application of fire safety requirements in the forensic examination of fires / V. I. Kozlachkov et al. // Technosphere safety technologies. 2013. № 4 (50). P. 4. EDN: SCCPLL.

8. Problem of statement of requirements of norms in the field of fire safety in Russia / V. N. Ivanov et al. // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2024. № 3. pp. 81–88. DOI: <https://10.25257/FE.2024.3.81-88>. EDN: VFQZHX.

9. Chistyakov D. A., Kalugin A. N., Turkina E. A. Reconstruction of buildings in the conditions of historical city development (on the example of reconstruction of the Polytechnic Museum in Moscow) // Innovations and Investments. 2021. № 3. pp. 293–296. EDN: WIOPIU.

10. Borovskaya K. I., Abakumov R. G., Avilova I. P. Evaluation of economic efficiency of reconstruction of non-residential buildings and review of cost-effective typical construction technologies in reconstruction // Innovative Economics: prospects of development and improvement. 2018. № 5 (31). pp. 10–15. EDN: VAGIGN.

11. Leonova A. N., Yastremskiy A. V., Korobov V. S. The concept of “Reconstruction” and the main problems arising in the reconstruction of buildings and structures // Science. Technics. Tekhnologii (Polytechnic bulletin). 2021. № 4. pp. 113–115. EDN: UNUMZG.

12. Tarikulieva M. Ya. Reconstruction of the industrial plant and replacement of its functional purpose for offices // Man. Sotsium. Society. 2022. № 3. pp. 78–83. EDN: DZPBXN.

13. Alekhovich A. O., Anuchin L. L. Assessment and adjustment of law enforcement practice of control and supervisory bodies: an index of administrative pressure // Voprosy gosudarstvennogo i munitsionnogo upravleniya. 2021. № 1. pp. 7–29. EDN: ONNIEX.

14. Review of violations of fire safety requirements admitted at the stage of design and construction of capital construction objects / I. B. Schastlivy et al. // Actual problems of fire safety : proceedings of the XXXVI Intern. scientific-practical conf. devoted to the 375th anniversary of the Russian fire protection. M. : publishing house of the All-Russian Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, 2024. pp. 134–138. EDN: DDNGYR.

15. Yushchenko N. A. Gulyaev A. D. Unauthorized change of immovable property in the Russian Federation (rearrangement, redevelopment, reconstruction, change of functional purpose) // Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. 2020. № 2 (85). pp. 135–144. EDN: CTDWFE.

16. Soldatova O. N. The use of retrospective project documentation in historical research: problems and ways of solution // Izvestia Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Historical Sciences. 2023. T. 5, № 3 (19). pp. 100–106. DOI: <https://10.37313/2658-4816-2023-5-3-100-106>. EDN: HKCQKA.

17. Normative and technical aspects of the composition of documentation for technical re-equipment / V. A. Slutsky et al. // Labor safety in industry. 2016. № 2. pp. 54–57. EDN: VLYUJJ.

18. Kulchitskiy D. A. Methods of reconstruction of public buildings and structures, technical and methodological solutions in choosing the type of reconstruction // Vestnik nauki. 2023. T. 2, № 11 (68). pp. 749–758. EDN: RDNCDDQ.

19. Shagoyko A. S. Analysis of peculiarities and legal basis for inventory of real estate // Science Week — 2022 : collection of abstracts: in 2 p. / edited by Y. A. Aslanov, O. V. Batychko, M. A. Lachugina, N. P. Sokhieva ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation ; Southern Federal University. Rostov-on-Don : Southern Federal University Publishing House, 2022. P. 1. pp. 801–803. EDN: VJYDIM.

20. Determination of the Supreme Court of the Russian Federation of 23.03.2017 № 306-KG17-1633 in case № A12-16492/2016.

21. Determination of the Supreme Court of 29.05.2019 № 302-ES19-1733 in case № A33-14695/2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Денис Юрьевич, научный сотрудник научно-исследовательского отдела организации надзорной деятельности учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4); ORCID: 0000-0001-9817-5316; SPIN-код: 3785-2792; Author ID: 768293; e-mail: D.Grigorev@academygps.ru

Плешаков Виталий Владимирович, канд. техн. наук., доц., начальник учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4); ORCID: 0000-0003-2698-1815; SPIN-код: 9461-4419; Author ID: 764189; e-mail: V.Pleshakov@mail.ru

Уваров Игорь Александрович, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела организации надзорной деятельности учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4); ORCID: 0009-0007-2707-8181; SPIN-код: 8547-2591; Author ID: 761017; e-mail: I.Uvarov@academygps.ru

Хохлова Алла Юрьевна, канд. техн. наук., доц., профессор кафедры надзорной деятельности учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4); SPIN-код: 6224-1876; Author ID: 467775; e-mail: nil42@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis Yu. Grigoriev, Research fellow of the Research Department of the Organization of Supervisory Activities of the Educational and Scientific Complex of the Organization of Supervisory Activities of the Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 St. Boris Galushkin, Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0000-0001-9817-5316; SPIN-code: 3785-2792; Author ID: 768293; e-mail: D.Grigorev@academygps.ru

Vitaly V. Pleshakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Educational and Scientific Complex of the Organization of Supervisory Activities of the Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 St. Boris Galushkin, Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0000-0003-2698-1815; SPIN-code: 9461-4419; Author ID: 764189; e-mail: V.Pleshakov@mail.ru

Igor A. Uvarov, Senior Research Fellow of the Research Department of the Organization of Supervisory Activities of the Educational and Scientific Complex of the Organization of Supervisory Activities of the Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 St. Boris Galushkin, Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0009-0007-2707-8181; SPIN-code: 8547-2591; Author ID: 761017; e-mail: I.Uvarov@academygps.ru

Alla Yu. Khokhlova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Supervisory Activity of the Educational and Scientific Complex of the Organization of Supervisory Activities of the Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 St. Boris Galushkin, Moscow, 129366, Russian Federation); SPIN-code: 6224-1876; Author ID: 467775; e-mail: nil42@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.02.2025
Одобрено после рецензирования 01.03.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 614.84.31

КОНДИЦИОНЕРЫ: ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ РИСКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Фирсов Александр Георгиевич, Загуменнова Марина Викторовна, Чечетина Татьяна Алексеевна
Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной
обороны МЧС России, г. Балашиха, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены ключевые выводы исследования пожарной опасности кондиционеров. Рассмотрен генезис систем кондиционирования воздуха и принципиальные схемы их устройства. Сделан обзор существующих классификаций кондиционеров по группам, видам конструктивных особенностей, а также способам их размещения и установки. Определена пожарная опасность исследуемых устройств и основные причины их возгорания. Проанализированы статистические данные по пожарам, вызванным кондиционерами, и их последствиям за 2019–2023 гг. Обозначены основные требования пожарной безопасности, установленные законодательством, к климатическим устройствам. Выявлены группы объектов и места наиболее частого возникновения пожаров от возгорания кондиционеров. Проведена оценка потенциальных рисков охраняемым законом ценностям. Авторами предложены дальнейшие пути обеспечения пожарной безопасности систем кондиционирования воздуха в зданиях на основе искусственного интеллекта и интеграции с системами пожарной защиты. Полученные результаты можно использовать для минимизации потенциальных рисков травмирования и гибели людей, а также причинения материального ущерба и в целом повышения пожарной безопасности рассматриваемых устройств.

Ключевые слова: кондиционер, пожарная опасность, фреон, обстановка с пожарами, гибель и травмирование людей, прямой материальный ущерб, потенциальный риск, объект пожара, причина пожара, место возникновения пожара, система пожарной защиты

Для цитирования: Фирсов А. Г., Загуменнова М. В., Чечетина Т. А. Кондиционеры: пожарная опасность, потенциальные риски последствий пожаров и перспективы в обеспечении пожарной безопасности // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 108–126.

AIR CONDITIONERS: FIRE DANGER, POTENTIAL RISKS OF FIRE CONSEQUENCES AND PROSPECTS IN ENSURING FIRE SAFETY

Aleksandr G. Firsov, Marina V. Zagumennova, Tatyana A. Chechetina
All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation

Abstract. The article presents the key conclusions of the study of fire hazard of air conditioners. The genesis of air-conditioning systems and principle schemes of their device are considered.

There is a review of existing classifications of air conditioners by groups, types of design features, as well as methods of their placement and installation. The fire danger of the investigated devices and the main reasons of their ignition are determined. Statistical data on fires caused by air conditioners and their consequences for 2019-2023 have been analyzed. The main fire safety requirements, established by legislation, for climatic devices are outlined. The groups of objects and places of the most frequent occurrence of fires caused by air conditioners are identified. Potential risks to legally protected values are assessed. The authors propose further ways to ensure fire safety of air conditioning systems in buildings on the basis of artificial intelligence and integration with fire protection systems. The obtained results can be used to minimise potential risks of injury and death of people, as well as causing material damage and, in general, to improve fire safety of the devices under consideration.

Keywords: air conditioning, fire danger, freon, fire situation, death and injury to people, direct material damage, potential risk, fire object, cause of fire, location of fire, fire protection system

For Citation: Firsov A. G., Zagumennova M. V., Chechetina T. A. Air conditioners: fire danger, potential risks of fire consequences and prospects in ensuring fire safety // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 108–126.

Введение

На протяжении многих столетий своего существования человечество активно боролось с различными вызовами природы и стремилось создать оптимальные биоклиматические условия жизни и деятельности. Еще в Древнем Египте и Персии для охлаждения жилищ использовали смоченные в воде циновки и плотные ткани. В некоторых станах Ближнего Востока использовали специальную башню бадгир (ловец ветра) с системой параллельных и перпендикулярных стенок, обеспечивающих охлаждение и постоянную циркуляцию воздуха в помещении. В Древнем Риме для этих же целей применялась специальная система акведуков, вода из которых проходила через специальные трубопроводы в стене и охлаждала внутренние помещения.

Опубликованная М. В. Ломоносовым в 1763 г. работа «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном» положила

начало научному развитию нового направления — кондиционирование воздуха в помещениях [1]. Другим теоретиком-исследователем был Ж. Шабаннес, который в 1815 г., опираясь на результаты исследований своего предшественника, изобрел метод кондиционирования зданий. Именно тогда впервые было использовано словосочетание condition (условие) и air (воздух). Однако техническое воплощение предложенной идеи осуществилось значительно позже.

Аппарат, способный производить лед и охлаждать воду (прототип холодильника), был запатентован О. Эвансом в 1805 г. и Д. Перкинсом в 1835 г. Дальнейшие шаги к созданию кондиционера были осуществлены медиком Д. Горри. Для снижения температуры воздуха в больничной палате он подвешивал к потолку емкость со льдом, что снижало температуру воздуха в помещении, размножение болезнетворных микробов и повышало шансы больных на выздоровление. В 1851 г. Д. Горри сконструировал

и запатентовал технический агрегат, состоящий из компрессора, сжимающего воздух, и охлаждающего змеевика. Разработанная им схема охлаждения используется и по сей день во всех современных кондиционерах и холодильниках [2].

Окончательно это техническое решение было воплощено в жизнь только в 1902 г. американским инженером Уиллисом, сконструировавшим машину, способную осуществлять кондиционирование воздуха (снижать температуру и поддерживать определенную влажность воздуха) в типографии, где он работал. Однако изобретение получило свое дальнейшее развитие как бизнес-проект лишь через несколько десятков лет. Только в 1929 г. фирмой General Electric был выпущен первый серийный бытовой комнатный кондиционер. В его конструкции использовался взрывоопасный и вредный для человека газ аммиак (было зарегистрировано несколько пожаров со смертельными последствиями), который в 1931 г. был заменен на фреон. В 1958 г. японская компания Daikin создала устройство, позволяющее не только охлаждать воздух, но и подавать внутрь помещения тепло, а в 1961 г. японская компания Toshiba разработала кондиционер, разделенный на два блока, что позволяло устанавливать его уже вне оконного проема и значительно снизить шум от компрессора, вынесенного на улицу [3, 4].

В 1975 г. в Советском Союзе, в Баку, был налажен выпуск первых отечественных бытовых оконных кондиционеров марок БК 1500, БК 2000 и БК 2500. В качестве прототипа использовался кондиционер фирмы Hitachi. Советские устройства стоили дорого (более 350 руб.), были шумными и всегда в дефиците, однако являлись надежными

и в основном поставлялись за рубеж: в Кубу, Австралию и другие страны [1].

Сегодня нельзя представить себе существование людей без кондиционеров, особенно в странах с жарким климатом. Современные исследования, проведенные международным сообществом ученых, в целом показали, что оптимальными климатическими условиями для человека являются следующие параметры.

- Температура в помещении в летний период года — 18–22 °С, в зимний период — 20–22 °С.
- Относительная влажность воздуха — 40–54 %.
- Скорость движения потоков воздушных масс — не более 0,2 м/с.
- Предельно допустимая кратность количества пыли и вредных веществ в воздухе — до 0,8.
- Уровень шумовых воздействий на человека — не более 68 дБ [5].

Современные устройства, осуществляющие кондиционирование воздуха, используются в промышленном и сельскохозяйственном производствах, в местах массового пребывания людей (торговые залы, кинотеатры, музеи, вокзалы, аэропорты и т. д.), жилых и административных помещениях, транспортных средствах и даже в космических аппаратах и эффективно справляются с поставленной задачей. С технической точки зрения существуют две принципиальных схемы устройства работы кондиционера компрессорного и испарительного типов (рис. 1).

Материалы и методы

Современные кондиционеры являются технически сложными устройствами и, в за-

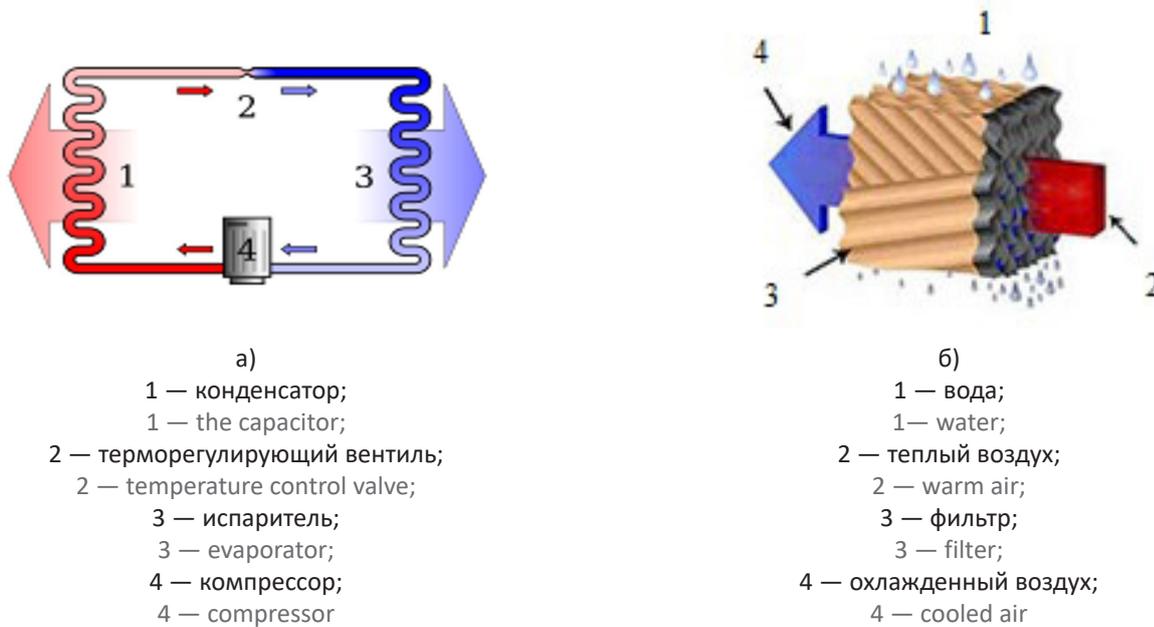


Рис. 1. Принципиальная схема устройства кондиционера компрессорного (а) и испарительного типов (б)
 Fig. 1. Schematic diagrams of compressor-type air conditioner (a) and evaporator-type air conditioner (b)

висимости от области применения, делятся на:

- бытовые;
- полупромышленные;
- промышленные.

Мощность бытовых кондиционеров составляет от 1 до 8 кВт (для сравнения мощность бытового электрического утюга или чайника составляет 1,5–2 кВт), а обслуживаемая ими площадь — до 100 м². Бытовые климатические устройства, обеспечивающие комфортные условия для жизни и деятельности людей, как правило, устанавливаются в жилых, административных и общественных помещениях. Полупромышленные кондиционеры характеризуются большей мощностью — до 30 кВт — и предназначены для жилых, торговых, бытовых, общественных и производственных помещений площадью от 100 м² до 300 м² [6]. Самые мощные — это промышленные кондиционеры, которые по своей сути являются сложными комплексами, обеспечивающими одновре-

менно множество климатических параметров. Их мощность может достигать 5 000 кВт, а зона обслуживания — более 300 м². Устройства этого типа устанавливаются в крупных жилых, промышленных, торговых и спортивных комплексах.

По своим конструктивным особенностям кондиционеры делятся на следующие виды:

- моноблочный кондиционер;
- сплит-система;
- мультисплит-система.

Кондиционеры в зависимости от способа их размещения и функциональных возможностей делятся на:

- настенные,
- кассетные,
- канальные,
- напольно-потолочные,
- колонные,
- мобильные,
- оконные,
- мультizonальные (VRV и VRF системы) [6, 7].

Каждый из перечисленных кондиционеров имеет свои технические характеристики, соответствующие стоящим перед ним задачам. Наиболее популярными и массовыми являются инверторные сплит-системы кондиционирования воздуха.

Несмотря на то, что сегодня кондиционер является технически совершенным и относительно безопасным в эксплуатации устройством, у него нередко случаются поломки, в т. ч. приводящие к пожарам. Основная причина пожаров от кондиционеров — это нарушение требований пожарной безопасности и последующей эксплуатации, изложенных в нормативных документах [8]. В основном эти нарушения связаны с электротехнической частью прибора:

- несоответствие сечения провода потребляемой мощности;
- оголенные провода;
- подключение к электросети без соответствующего заземления и устройств защиты от короткого замыкания;
- перегрузка электрической сети;
- старая электрическая проводка с низкими параметрами сопротивления изоляции;
- подключение электрических проводов с использованием скрутки и т. д.

Согласно статистике, по обозначенным выше причинам случается до 91 % возгораний. На эту категорию пожаров от кондиционеров приходится 100 % погибших и 82 % травмированных, а материальный ущерб составляет более 98 %. На транспортных средствах из-за нарушения монтажа и последующей эксплуатации указанных устройств происходит порядка 1,9 % пожаров. Количество травмированных в этом случае составляет 9,1 %, а ущерб от пожара — 0,5 %. Также возгорания конди-

ционеров иногда обусловлены недостатками самой конструкции изделия и используемой в них элементной базы. Подобные происшествия составляют около 1,3 % и характеризуются количеством травмированных — 1,3 %, долей материального ущерба — 1,3 %. Еще одна возможная причина возгорания — нарушение процесса охлаждения компрессора внутри устройства, из-за чего ежегодно регистрируется до 0,3 % пожаров от кондиционеров.

Один из вопросов пожарной опасности кондиционеров связан с использованием в качестве хладагента различных марок фреона, часть которых содержит в себе не только вредные, но и горючие газы. Например, в состав фреона R-290 входит пропан, а в R-717 — аммиак и т. д. До сих пор в быту используются устаревшие модели кондиционеров с опасными для человека фреонами. В современных моделях уже используются более экологические и пожаробезопасные, универсальные с точки зрения их применения и более эффективные марки фреонов [9]. Однако следует отметить, что некоторые вещества, используемые в нынешних устройствах, относятся к слабогорючим, например фреон R-32.

В теории возгорание фреонов, содержащих горючие газы, возможно при следующих условиях: создание взрывоопасной концентрации газов (горючая смесь находится в концентрационных пределах) и наличие источника зажигания. Однако в бытовых кондиционерах содержится небольшой объем фреона, что не позволяет образовавшейся концентрации газовой смеси подняться даже до значений нижнего порога концентрационного предела воспламенения. Так, помещение, площадь которого равна 20 м², за короткий промежуток

времени необходимо наполнить объемом фреона, содержащимся в 14 сплит-системах, чтобы в нем произошло образование опасной концентрации R32 [10]. К тому же минимальная энергия, необходимая для зажигания большинства марок фреона, составляет около 15 МДж, а температура самовоспламенения — 648 °С. Следовательно, вероятность возникновения возгорания от бытового кондиционера из-за находящегося в нем фреона практически равна нулю. Однако если говорить о промышленных и полупромышленных кондиционерах, то наличие в них большого объема хладагента может существенно повысить риск как возникновения пожара, так и его дальнейшего развития.

Сегодня на территории РФ регистрируется порядка 138 пожаров в год от различных типов кондиционеров. В указанных происшествиях погибает около 3 чел. и получают

травмы 4 чел., а материальный ущерб в среднем составляет 16,5 млн руб. Динамика пожаров, возникших от возгорания кондиционеров, и их последствий за период с 2019 по 2023 гг. приведена на рис. 2–4.

Количество пожаров от кондиционеров характеризуется тенденцией роста числовых значений. В абсолютных значениях количество пожаров увеличилось со 117 до 134 ед. (рис. 2) с величиной прироста более 14 %. Такая же тенденция наблюдается и в отношении материальных последствий пожаров. Значения прямого материального ущерба выросли с 4,3 млн руб. в 2019 г. до 35,2 млн руб. в 2023 г. (рис. 4). Относительный прирост за рассматриваемый временной период составил более 718 %. Динамика количества погибших и травмированных при пожарах людей характеризуется тенденцией снижения, о чем говорят соответствующие линии тренда на графике (рис. 3).

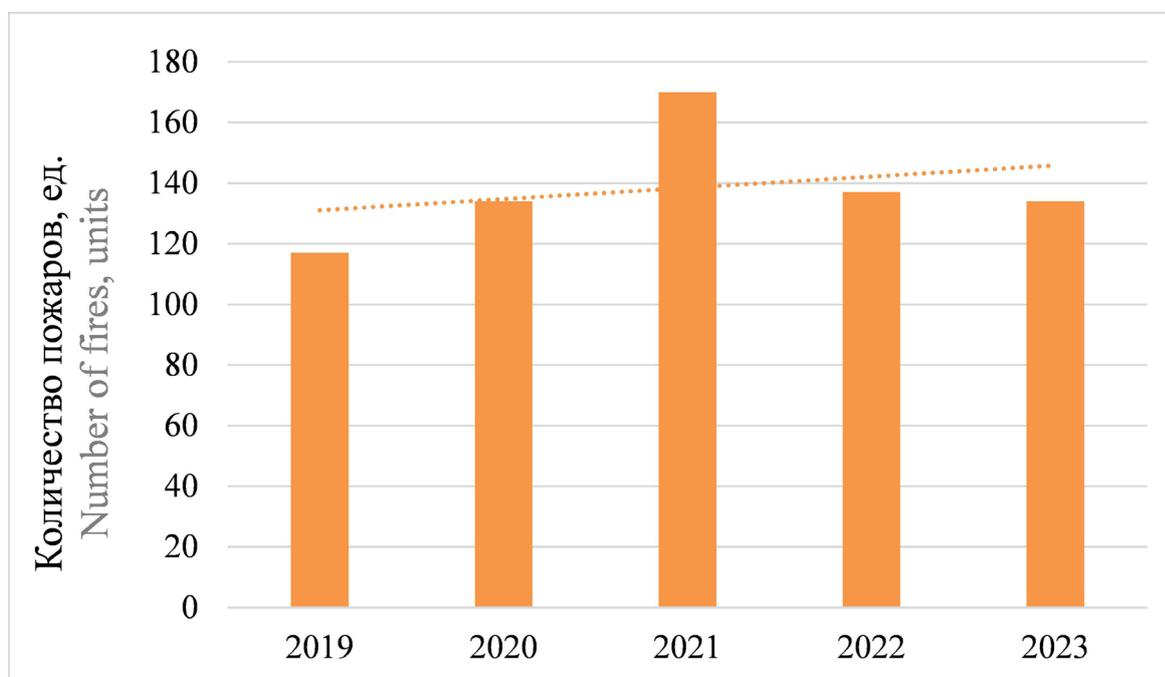


Рис. 2. Динамика распределения количества пожаров, возникших от возгорания кондиционеров, на территории РФ за 2019–2023 гг.

Fig. 2. Dynamics of the distribution of the number of fires caused by air conditioners on the territory of the Russian Federation for 2019–2023

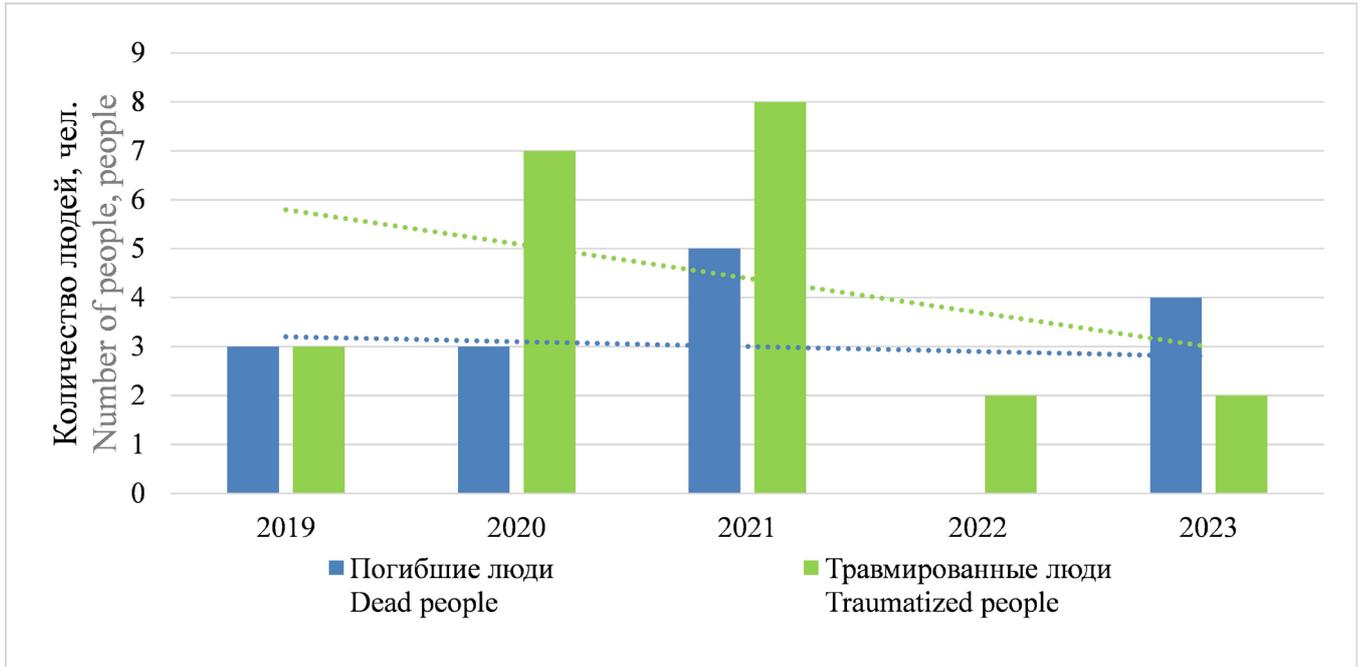


Рис. 3. Динамика распределения количества погибших и травмированных людей при пожарах, возникших от возгорания кондиционеров, на территории РФ за 2019–2023 гг.

Fig. 3. Dynamics of the distribution of the number of perished and injuries in fires caused by air conditioners on the territory of the Russian Federation for 2019–2023

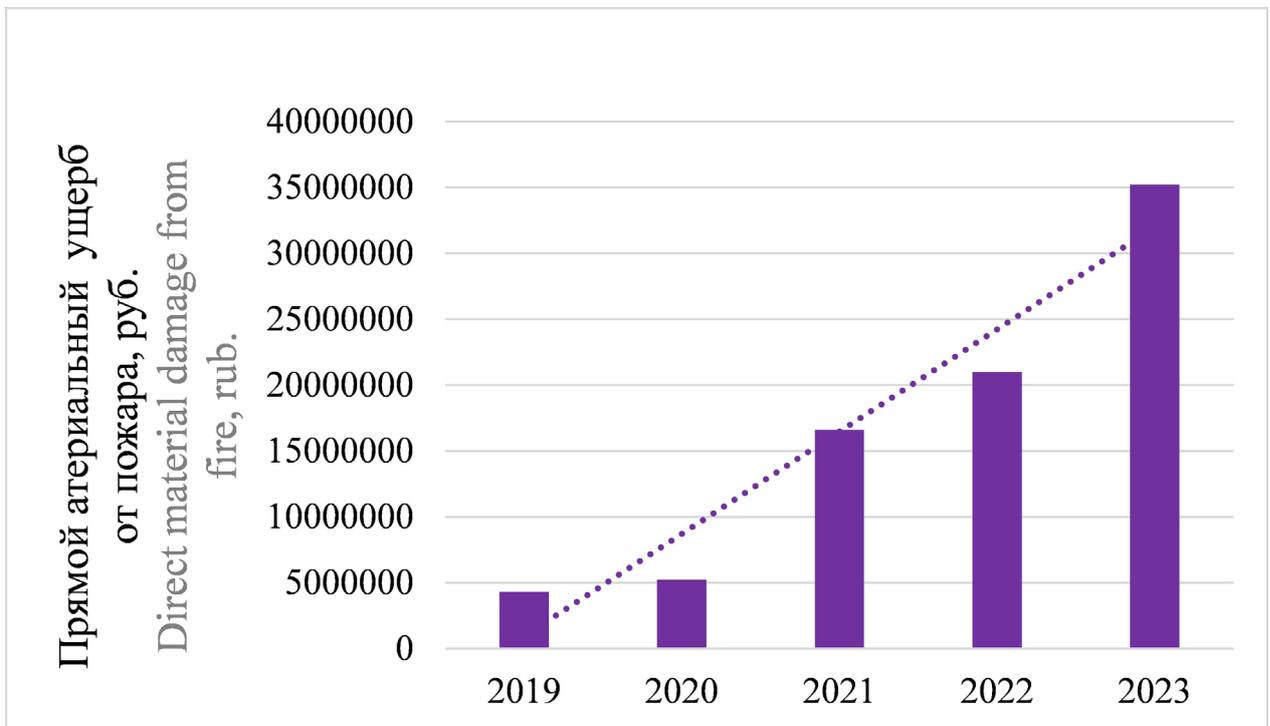


Рис. 4. Динамика распределения материального ущерба от пожаров, возникших при возгорании кондиционеров, на территории РФ за 2019–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of the distribution of material damage from fires caused by the ignition of air conditioners on the territory of the Russian Federation in 2019–2023

Долевое распределение суммарного количества пожаров из-за кондиционеров за 2019–2023 гг. по объектам их возникновения приведено в табл. 1. В общей сложности около 50 % всех возгораний, связанных с рассматриваемыми устройствами, приходится на объекты жилого сектора: на многоквартирные жилые дома — порядка 30,8 % пожаров, на многоквартирные жилые дома — 14,5 %, а на здания жилого назначения и надворные постройки — 4,6 %.

Если говорить о последствиях пожаров, то их наибольшие значения также регистрируются на объектах жилого сектора. Суммарное количество погибших людей составляет более 93 %, травмированных — почти 82 %, а прямой материальный ущерб — более 20 %. Такое распределение количества пожаров вполне ожидаемо, т. к. именно в зданиях

и сооружениях жилого сектора сосредоточено основное количество бытовых кондиционеров. Это подтверждается официальными данными Росстата: по итогам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств на конец 2023 г. среднее количество кондиционеров в расчете на 100 домохозяйств составило 53 ед. [11]. Следовательно, более 50 % домохозяйств РФ обеспечено кондиционерами. Причем степень оснащенности объектов жилого сектора этими устройствами, а также их мощностные характеристики в значительной мере зависят от уровня дохода населения.

Второе место по количеству пожаров занимают предприятия торговли — 22 %. Величина материального ущерба на указанных объектах самая высокая и составляет более 60 %. Что тоже вполне объяснимо и закономерно.

Таблица 1
Долевое соотношение количества пожаров из-за кондиционеров и их последствий по основным группам объектов в 2019–2023 гг.

Table 1
Ratio of the number of fires from air conditioners and their consequences by the main groups of facilities in 2019–2023

Перечень основных групп объектов пожара List of main groups fire objects	Долевое соотношение Share ratio			
	Количество пожаров, ед. Number of fires, units	Количество погибших, чел. The number of people killed, people	Количество травмированных, чел. The number of injured, people	Материальный ущерб, тыс. руб. Material damage, thousand rubles
Здания, помещения учебно-воспитательного назначения Buildings, premises for educational purposes	0,6	0,0	0,0	0,2
Здания, помещения здравоохранения и социального обслуживания населения Buildings, premises for health care and social services	1,0	0,0	0,0	1,3

Продолжение таблицы 1

Перечень основных групп объектов пожара List of main groups fire objects	Долевое соотношение Share ratio			
	Количество пожаров, ед. Number of fires, units	Количество погибших, чел. The number of people killed, people	Количество травмированных, чел. The number of injured, people	Материальный ущерб, тыс. руб. Material damage, thousand rubles
Здания, сооружения и помещения для культурно-досуговой деятельности населения и религиозных обрядов Buildings, structures and premises for cultural and leisure activities of the population and religious ceremonies	0,4	0,0	4,5	0,1
Здания и помещения для временного пребывания (проживания) людей Buildings and premises for temporary stay (residence) of people	1,3	0,0	0,0	0,3
Здания, сооружения и помещения предприятий торговли Buildings, constructions and premises for trade enterprises	22,0	0,0	0,0	60,7
Здания, помещения сервисного обслуживания населения Buildings, constructions and premises for servicing the population	5,1	0,0	0,0	8,5
Объекты транспортной инфраструктуры Transport infrastructure facilities	0,6	0,0	0,0	0,0
Места открытого хранения веществ, материалов, с/х угодья и прочие открытые территории Open storage of substances, materials, agricultural land and other open areas	1,2	0,0	0,0	0,0
Административные здания Administrative buildings	8,2	0,0	0,0	1,1
Здания жилого назначения и надворные постройки Residential buildings and outbuildings	4,6	6,7	0,0	1,5
Многоквартирные жилые дома Multi-family dwellings	30,8	33,3	63,6	14,6
Одноквартирные жилые дома Single-family dwellings	14,5	53,3	18,2	6,1

Окончание таблицы 1

Перечень основных групп объектов пожара List of main groups fire objects	Долевое соотношение Share ratio			
	Количество пожаров, ед. Number of fires, units	Количество погибших, чел. The number of people killed, people	Количество травмированных, чел. The number of injured, people	Материальный ущерб, тыс. руб. Material damage, thousand rubles
Здания производственного назначения Industrial buildings	3,2	0,0	4,5	4,8
Складские здания, сооружения Warehouse buildings, constructions	0,9	0,0	0,0	0,2
Объекты транспортной инфраструктуры Transport infrastructure facilities	0,6	0,0	0,0	0,0
Объекты сельскохозяйственного назначения Agricultural buildings	0,1	0,0	0,0	0,0
Бесхозные, неэксплуатируемые здания и сооружения Derelict, unused buildings and constructions	0,1	0,0	0,0	0,0
Строящиеся, реконструируемые здания Buildings under construction or reconstruction	0,4	0,0	0,0	0,0
Другие объекты пожара Other fire objects	1,0	6,7	0,0	0,1

Учитывая, что кондиционеры, как правило, устанавливаются в местах наиболее частого и длительного пребывания людей, то, конечно, и наибольшее количество пожаров и их последствий должно регистрироваться именно в таких местах. Исходя из анализа имеющейся статистики, большинство из них, а именно 156 ед., за исследуемый период приходится на комнаты, жилые и спальные помещения, что составляет около 23 % от всех зарегистрированных пожаров из-за кондиционеров. Количество погибших и людей, получивших травмы, соответствен-

но составляет 12 чел. и 13 чел. В долевом соотношении это 80 % и 59 %. Прямой материальный ущерб от пожара в рассматриваемых выше помещениях составляет всего 5,2 млн руб., или 6,4 % от общей суммы зарегистрированного ущерба. Наибольшие его значения, а именно 48,8 млн руб., отмечаются в торговом зале, операционном зале почты, биржи, банка и др. В долевом отношении это более 59 %.

К сожалению, рассмотренная информация, которая аккумулируется в базе данных «Пожары» и официальных статистических

изданиях [12–16], не дает полного представления о типах, видах и марках используемых кондиционеров, от которых возник пожар. Однако учитывая, что наибольшее количество пожаров и их последствий связано с жилым сектором, можно с большой долей вероятности предположить, что это в основном бытовые сплит-системы.

Результаты и обсуждения

Оснащенность жилых и промышленных объектов системами кондиционирования воздуха с каждым годом увеличивается, что ведет к дальнейшей эскалации рисков

возникновения пожаров и, соответственно, к увеличению их потенциальных последствий. Рассматриваемые системы становятся более сложными и многозадачными, использующими современную элементную базу и новые материалы, поэтому оценка потенциальных рисков пожаров и их последствий позволит своевременно выявить проблемные точки и разработать комплекс необходимых мер по дальнейшему обеспечению пожарной опасности систем кондиционирования.

По формуле (1) был осуществлен расчет потенциального риска возможных последствий пожаров из-за кондиционеров:

$$R_{\text{пож.конд.}i} = \frac{\sum_{j=1}^T N_{\text{пож.конд.}i}^j}{\sum_{j=1}^T N_{\text{пож.конд.}j}^j}, \quad (1)$$

где $R_{\text{пож.конд.}i}$ — показатель в расчете на пожар из-за кондиционера за время T , $i = 1..4$;

$i = 1$ — количество погибших на пожаре из-за кондиционера, чел./ед. · год);

$i = 2$ — количество людей, получивших травмы на пожаре из-за кондиционера, чел./ед. · год);

$i = 3$ — совокупное количество погибших и людей, получивших травмы на пожаре из-за кондиционера, чел./ед. · год);

$i = 4$ — ущерб от пожара, возникшего из-за возгорания кондиционера, (руб./ед. · год)

$N_{\text{пож.конд.}i}^j$ — значение показателя i -го события или потенциальных последствий пожаров из-за кондиционеров за j -й год, $j = 1..T$;

$N_{\text{пож.конд.}j}^j$ — количество пожаров от кондиционеров за j -й год, $j = 1..T$ (ед. · год);

$T = 5$ лет.

Расчет потенциальных рисков последствий пожаров из-за кондиционеров осуществлялся по основным группам объектов пожара и в целом по РФ. Основные результаты приведены в табл. 2, но только по тем группам объектов, на которых были получены не нулевые значения показателей.

Выяснилось, что в целом по РФ потенциальные последствия пожаров из-за кондиционеров имеют низкие значения: гибель — 0,02 чел., травмы — 0,03 чел., (консолидированные гибель и травмирование — 0,05 чел.), ущерб — 119 тыс. руб. Однако они достаточно усредненные, не учитывающие специфику вышеописанной статистической зависимости для отдельных групп объектов.

Пожары в жилье также характеризуются низкими значениями потенциальных последствий: гибель — 0,04 чел., травмы — 0,05 чел.,

(консолидированные гибель и травмирование — 0,09 чел.), ущерб — 52,9 тыс. руб.

Анализ значений потенциальных рисков последствий пожаров для отдельных групп объектов, приведенных в табл. 2, показал следующее. Высокий риск гибели людей при пожаре (0,14 чел.) ожидается в зданиях и сооружениях, относящихся к группе «другие объекты пожара». Высокий потенциальный риск травмирования людей при пожаре (0,33 чел.) отмечается в зданиях и сооружениях культурно-досуговой деятельности населения и религиозных обрядов. Если говорить о прямом материальном ущербе от пожаров, возник-

ших из-за возгорания кондиционеров, то его высокие значения в расчете на один пожар характерны для следующих зданий, сооружений и помещений групп объектов: предприятия торговли (329 тыс. руб.), сервисного обслуживания населения (199 тыс. руб.), производственного назначения (178 тыс. руб.), здравоохранения и социального обслуживания населения (153 тыс. руб.). Таким образом, перечисленные выше объекты имеют высокий риск потенциальных последствий пожаров от кондиционеров.

По предварительным данным (по состоянию на 15.01.2025) на территории РФ в 2024 г.

Таблица 2
Потенциальный риск последствий пожаров из-за кондиционеров по основным группам объектов в 2019–2023 гг.

Table 2
Potential risk of fire consequences due to air conditioning by major facility group in 2019–2023

Перечень основных групп объектов пожара List of main groups fire objects	Потенциальный риск последствий пожара Potential risk of fire consequences		
	Количество погибших, чел. The number of people killed, people	Количество травмированных чел. The number of injured people, people	Материальный ущерб, тыс. руб. Material damage, thousand rubles
Здания, помещения учебно-воспитательного назначения Buildings, premises for educational purposes	0,00	0,00	32 694
Здания, помещения здравоохранения и социального обслуживания населения Buildings, premises for health care and social services	0,00	0,00	153 752
Здания, сооружения и помещения для культурно-досуговой деятельности населения и религиозных обрядов Buildings, structures and premises for cultural and leisure activities of the population and religious ceremonies	0,00	0,33	16 667
Здания и помещения для временного пребывания (проживания) людей Buildings and premises for temporary stay (residence) of people	0,00	0,00	24 444

Окончание таблицы 2

Перечень основных групп объектов пожара List of main groups fire objects	Потенциальный риск последствий пожара Potential risk of fire consequences		
	Количество погибших, чел. The number of people killed, people	Количество травмированных чел. The number of injured people, people	Материальный ущерб, тыс. руб. Material damage, thousand rubles
Здания, сооружения и помещения предприятий торговли Buildings, constructions and premises for trade enterprises	0,00	0,00	329 065
Здания, помещения сервисного обслуживания населения Buildings, constructions and premises for servicing the population	0,00	0,00	199 967
Места открытого хранения веществ, материалов, с/х угодья и прочие открытые территории Open storage of substances, materials, agricultural land and other open areas	0,00	0,00	1 250
Административные здания Administrative buildings	0,00	0,00	15 768
Здания жилого назначения и надворные постройки Residential buildings and outbuildings	0,03	0,00	37 363
Многоквартирные жилые дома Multi-family dwellings	0,02	0,07	56 365
Одноквартирные жилые дома Single-family dwellings	0,08	0,04	50 608
Здания производственного назначения Industrial buildings	0,00	0,05	178 362
Складские здания, сооружения Warehouse buildings, constructions	0,00	0,00	25 000
Строящиеся, реконструируемые здания Buildings under construction or reconstruction	0,00	0,00	8 333
Другие объекты пожара Other fire objects	0,14	0,00	7 571
Всего по России Total for Russia	0,02	0,03	119 014

зарегистрировано 116 пожаров из-за кондиционеров, характеризующихся следующими последствиями: количество погибших —

1 чел., количество травмированных — 3 чел., прямой материальный ущерб от пожара — 6 947 тыс. руб. В целом потенциальные

риски последствий пожаров идентичны расчетным рискам, приведенным выше: гибель — 0,01 чел., травмирование — 0,03 чел. (консолидированные гибель и травмирование — 0,034 чел.), ущерб — 60 тыс. руб.

Сегодня кондиционеры, в т. ч. и бытовые, стали неотъемлемой частью нашей жизни. Пожарная безопасность различных систем кондиционирования воздуха регулируется системой нормативных правовых документов. Они предъявляют соответствующие требования к размещению, проектированию и обслуживанию рассматриваемых устройств. В современных проектных решениях для установки внешних блоков бытовых кондиционеров в жилых домах и административных зданиях предусматривают специальные конструкции для крепления на фасадах (консоли, скрытые ниши и др.). Бытовые кондиционеры являются электроприборами, поэтому для них установлены такие же требования, как и для других устройств подобного типа. Например, новогодние елки и горючие материалы должны размещаться на расстоянии не менее 1 м от кондиционеров, запрещается закрывать вентиляционные отверстия и каналы систем кондиционирования воздуха, размещать внешние их блоки на лестничных клетках, в поэтажных коридорах, открытых переходах наружных воздушных зон незадымляемых лестничных клеток, использовать кондиционеры для удаления продуктов горения [17] и др. К климатическим устройствам предъявляются дополнительные требования по обеспечению пожарной безопасности для вентиляции, если они интегрированы в общую приточно-вытяжную систему, которую необходимо отключать при пожаре в помещении для снижения интенсивности распространения горения.

Выводы

Результаты исследования позволили сделать вывод, что риск гибели и травмирования людей при пожаре из-за кондиционера значительно выше, чем установленное нормативное значение 10^{-6} . Проектирование систем кондиционирования воздуха, вентиляции, дымоудаления представляет собой сложную и всеобъемлющую инженерную систему, которая охватывает все элементы внутри и снаружи здания, включая, помимо прочего, воздуховоды, вытяжные отверстия и трубопроводы, а также различные конструктивные элементы зданий. Для снижения пожарной опасности обозначенных систем необходим поиск новых инженерных, технологических и архитектурно-строительных решений.

В работе [18] описаны результаты научных исследований, связанные с ранним обнаружением пожара в кондиционируемых помещениях. Воздушные потоки, создаваемые воздухоохладительным устройством в помещениях, существенно влияют на концентрацию и состав дыма, что затрудняет раннее обнаружение пожара. Для распознавания признаков пожара (пламя, дым, температура) в помещениях, оборудованных кондиционерами, необходимо использовать пожарные датчики с более низким уровнем сигнала, чем у традиционных устройств. Для этой цели исследователи предлагают использовать многосенсорные пожарные извещатели, являющиеся высокоэффективными устройствами обнаружения возгораний в кондиционируемых помещениях.

В статье [19] подробно анализируются характеристики, принцип работы и процесс установки комплексной системы отопле-

ния, вентиляции, кондиционирования воздуха, дымоудаления и вытяжки. На основе метода компьютерной графики, который позволяет отображать объекты более реалистично (PBR), согласно техническим условиям проектирования, определяется форма компоновки системы и количество необходимого оборудования в каждой комнате.

В будущем системы кондиционирования вероятно будут управляться искусственным интеллектом. Их дальнейшее развитие неразрывно связано с IT-технологиями и источниками возобновляемой энергии. Уже на современном этапе экономического развития с использованием технологии VRVIII проектируются сложные, разветвленные и многозадачные автоматизированные системы кондиционирования зданий, обеспечивающие различные биоклиматические параметры в нескольких помещениях одновременно [7].

В 2017 г. был анонсирован амбициозный проект по созданию стеклянного города будущего в пустыне Саудовской Аравии. В соответствии с планом здание должно быть длиной 170 км, шириной 200 м и высотой (глубиной) 500 м и вмещать в себя около 9 млн чел. [20, 21]. По сути, это будет огромный автономный, многоуровневый город, оснащенный самыми современными технологиями, в т. ч. и системами, обеспечивающими комфортные климатические условия. Очевидно, что дальнейшее развитие градостроительства будет связано именно с таким вектором развития общества, поэтому для защиты людей потребуются кардинальное изменение всей системы обеспечения пожарной безопасности.

Сложность современных систем кондиционирования и интеграция их с системами вентиляции повышают риск пожарной опас-

ности, а также, следовательно, и возникновения и развития пожара и ожидаемых последствий от него. В связи с этим очень важно своевременно определить место возникновения пожара, отключить систему кондиционирования и вентиляции в помещении, а вместо нее включить системы противодымной вентиляции и пожаротушения (при их наличии). Это возможно осуществить за счет создания новых «умных кондиционеров» в виде мульти-сплит систем, объединенных не только с вентиляцией, но и с системой обнаружения и тушения пожаров. Такие исследования уже проводятся зарубежными компаниями Johnson Controls и Mircom [22].

Создание комбинированной системы, объединяющей в себе функции не только систем кондиционирования и вентиляции, но и оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, автоматического тушения пожаров, охраны и видеонаблюдения и управляющейся посредством искусственного интеллекта, позволит обнаружить и ликвидировать пламя еще на ранней стадии его развития, а также значительно снизить существующие риски потенциальных последствий от любых пожаров. Такая система может избирательно, в области возгорания, отключить электроснабжение, кондиционирование и вентиляцию воздуха, своевременно оповестить людей о начале эвакуации и осуществить необходимый контроль за ее ходом, после чего при отсутствии людей включить установки пожаротушения. Одновременно система на путях эвакуации может создать комфортные условия для безопасной эвакуации людей (обеспечить дымоудаление и фильтрацию воздуха, снизить температуру воздуха, включить аварийное освещение и т. д.). Рассматриваемое решение

по обеспечению пожарной безопасности относится к сложным системам управления и требует серьезной технической, правовой, логико-математической и программно-компьютерной проработки, а также проведения серии необходимых испытаний по различным сценариям развития пожара

в зданиях. Использование предложенного авторами статьи инновационного подхода позволит выйти уже на новый уровень обеспечения пожарной безопасности объектов защиты, снизить риски возгорания, угрозы жизни и здоровью людей и потенциальных последствий пожаров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Остынь немного: история кондиционера // Дилетант : информационный интернет-портал. URL: <https://diletant.media/articles/26195546/?ysclid=m84h4ofj6h393816772> (дата обращения: 04.01.2025).
2. Кондиционер: краткая история создания // Хабр : информационный интернет-портал. URL: <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/767800/> (дата обращения: 04.01.2025).
3. Кондиционер // Википедия Свободная энциклопедия : информационный интернет-портал. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%80> (дата обращения: 04.01.2025).
4. История Кондиционера: Эволюция, которая изменила мир // TCL : информационный интернет-портала. URL: <https://www.tcl.com/ru/ru/blog/history-of-air-conditioner/> (дата обращения: 04.01.2025).
5. Комфортные условия жизнедеятельности // Справочник : сайт. URL: https://spravochnick.ru/bezopasnost_zhiznedeyatelnosti/komfortnye_usloviya_zhiznedeyatelnosti/ (дата обращения: 04.01.2025).
6. Современные типы и виды кондиционеров // Комсомольская правда : интернет-газета. URL: <https://www.kp.ru/guide/typy-konditsionerov.html> (дата обращения: 04.01.2025)
7. Классификация кондиционеров // Ru Klimat : информационный интернет-портал. URL: <https://ru-klimat.ru/articles/klassifikatsiya-konditsionerov/?ysclid=m5iaum0h6g675946326/> (дата обращения: 04.01.2025).
8. Названы причины, по которым становится пожароопасным необходимое в жару устройство // MKRU : сайт. URL: <https://www.mk.ru/social/2024/07/11/nazvany-prichiny-pokotorym-stanovitsya-pozharoopasnym-neobkhodimoe-v-zharu-ustroystvo.html> (дата обращения: 06.01.2025).
9. Фреоны для кондиционеров — какой выбрать для максимальной эффективности и безопасности? // МосОблКлимат : сайт. URL: <https://mosoblklimat.ru/blogs/blog/freony-dlya-konditsionerov-kakoy-vybrat-dlya-maksimalnoy-effektivnosti-i-bezopasnosti?ysclid=m5idwkoz2b559580288/> (дата обращения: 04.01.2025).
10. Характеристики фреона R32. Его свойства // АлькорКлимат : сайт. URL: <https://alkorclimat.by/novosti/freon-r32.-novo-pokolenie-kladagentov> (дата обращения: 06.01.2025).

11. Российский статистический ежегодник. 2024 // Росстат : сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 07.01.2025).
12. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году : информационно-аналитический сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с. EDN B5ONFO.
13. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году : информационно-аналитический сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с. EDN IKFNVG.
14. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистика пожаров и их последствий : статистический сборник / В. С. Гончаренко [и др.]. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с. EDN LVXFQJ.
15. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : статистический сборник / П. В. Полехин [и др.]. Балашиха : ВНИИПО МЧС России, 2021. 111 с. EDN MMJAMI.
16. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : статистический сборник / под общ. ред. Д. М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с. : ил. 30.
17. Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. от 30.03.2023) // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565837297> (дата обращения: 06.03.2025).
18. Satoh, K. Study Of Early And Reliable Fire Detection In Air-conditioned Rooms // Fire Safety Science. 1994, № 4. pp. 173–184. DOI: <https://10.3801/IAFSS.FSS.4-173>.
19. Zhang, Jialun Design and Analysis of Smoke Control Construction Drawing for Heating, Ventilation and Air Conditioning Based on PBR Algorithm // Advances in Smart Materials and Innovative Buildings Construction Systems. 2025. pp. 403–413. DOI: https://10.1007/978-3-031-72509-8_34.
20. Как идет строительство The Line, города будущего в пустыне // Хабр : информационный интернет-портал. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/801937/> (дата обращения: 18.01.2025).
21. Maraya Concert Hall: зеркальный куб в аравийской пустыне // livejournal : интернет-журнал. URL: <https://lakhtacenter.livejournal.com/761204.html> (дата обращения: 18.01.2025).
22. Кучеркова А. Д. Принцип работы и особенности устройств управления мульти-сплит систем с пожаровзрывозащитой // Обществознание и социальная психология. 2023. № 11–3 (54). С. 133–137. EDN MDLKQL.

REFERENCES

1. Cool down a little: the history of air conditioner // Dilettant : informational internet-portal. URL: <https://dilettant.media/articles/26195546/?ysclid=m84h4ofj6h393816772> (date of application: 04.01.2025).
2. Air conditioner: a brief history of creation // Hubr : information internet-portal. URL: <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/767800/> (date of application: 04.01.2025).

3. Air conditioner // Wikipedia Free encyclopedia : information internet-portal. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%80> (date of application: 04.01.2025).
4. History of Air Conditioner: The Evolution that Changed the World // TCL : information internet-portal. URL: <https://www.tcl.com/ru/ru/blog/history-of-air-conditioner/> (date of application: 04.01.2025).
5. Comfortable living conditions // Directory : website. URL: https://spravochnick.ru/bezopasnost_zhiznedeyatelnosti/komfortnye_usloviya_zhiznedeyatelnosti/ (date of application: 04.01.2025).
6. Modern types and types of air conditioners // Komsomolskaya Pravda : internet-newspaper. URL: <https://www.kp.ru/guide/typy-konditsionerov.html> (date of application: 04.01.2025).
7. Classification of air conditioners // Ru Klimat : informational internet-portal. URL: <https://ru-klimat.ru/articles/klassifikatsiya-konditsionerov/?ysclid=m5iaum0h6g675946326/> (date of application: 04.01.2025).
8. The reasons why the device necessary in the heat becomes fire hazardous // MKRU : website. URL: <https://www.mk.ru/social/2024/07/11/nazvany-prichiny-po-kotorym-stanovitsya-pozharoopasnym-neobkhodimoe-v-zharu-ustroystvo.html> (date of application: 06.01.2025).
9. Freons for air conditioners — which one to choose for maximum efficiency and safety? // MosObklimat : website. URL: <https://mosobklimat.ru/blogs/blog/freony-dlya-konditsionerov-kakoy-vybrat-dlya-maksimalnoy-effektivnosti-i-bezopasnosti?ysclid=m5idwkoz2b559580288/> (date of application: 04.01.2025).
10. Characteristics of Freon R32. Its properties // AlkorKlimat : website. URL: <https://alkor-klimat.by/novosti/freon-r32.-novoe-pokolenie-kladagentov> (date of application: 06.01.2025).
11. Russian Statistical Yearbook. 2024 // Rosstat : website. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (date of application: 07.01.2025).
12. Fires and fire safety in 2023 : information and analytical collection / V. S. Goncharenko et al. Balashikha : VNIPO MES of Russia, 2024. 110 p. EDN BSONFO.
13. Fires and fire safety in 2022 : information and analytical collection / V. S. Goncharenko et al. Balashikha : VNIPO MES of Russia, 2023. 80 p. EDN IKFNVG.
14. Fires and fire safety in 2021: statistics of fires and their consequences : statistical compendium / V. S. Goncharenko et al. Balashikha : VNIPO MES of Russia, 2022. 114 p. EDN LVXFQJ.
15. Fires and fire safety in 2020 : statistical compendium / P. V. Polekhin et al. Balashikha : VNIPO MES of Russia, 2021. 111 p. EDN MMJAMI.
16. Fires and Fire Safety in 2019 : statistical compendium / under the general editorship of D. M. Gordienko. M. : VNIPO, 2020. 80 p. : ill. 30.
17. On Approval of the Rules of Fire Prevention in the Russian Federation : Resolution of the Government of the Russian Federation from 16.09.2020 № 1479 (ed. from 30.03.2023) // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565837297> (date of application: 06.03.2025).
18. Satoh, K. Study Of Early And Reliable Fire Detection In Air-conditioned Rooms // Fire Safety Science. 1994, № 4. pp. 173–184. DOI: <https://10.0.14.217/IAFSS.FSS.4-173>.

19. Zhang, Jialun Design and Analysis of Smoke Control Construction Drawing for Heating, Ventilation and Air Conditioning Based on PBR Algorithm.//Advances in Smart Materials and Innovative Buildings Construction Systems/2025, Book Chapter, pp. 403–413. DOI: https://10.1007/978-3-031-72509-8_34.

20. How the construction of The Line, the city of the future in the desert is going // Hubr : information internet-portal. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/801937/> (date of application: 18.01.2025).

21. Maraya Concert Hall: a mirror cube in the Arabian desert // livejournal : internet-journal. URL: <https://lakhtacenter.livejournal.com/761204.html> (date of application: 18.01.2025).

22. Kucherкова А. Д. Printsip raboty i osobennosti ustroystva upravleniya multi-split sistem s pozharovzryvozhachita [Principle of work and features of control devices of multi-split systems with fire explosion protection]. 2023. № 11–3 (54). pp. 133–137. EDN MDLKL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фирсов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела пожарной статистики ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12); РИНЦ ID: 462043; ORCID: 0000-0003-3272-1972; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Загуменнова Марина Викторовна, начальник сектора отдела пожарной статистики ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12); РИНЦ ID: 749141; ORCID: 0000-0002-7867-8175; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Чечетина Татьяна Алексеевна, научный сотрудник отдела пожарной статистики ВНИИПО МЧС России (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, д. 12); ORCID: 0000-0003-3505-9371; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander G. Firsov, Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the Department of Fire Statistics of VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); RSCI ID: 462043; ORCID: 0000-0003-3272-1972; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Marina V. Zagumennova, Head of Sector of the Fire Statistics Department of VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); RSCI ID: 749141; ORCID: 0000-0002-7867-8175; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Tatyana A. Chechetina, Research fellow of Fire Statistics Department of VNIIPPO EMERCOM of Russia (12 mkr. VNIIPPO, Balashikha, 143903, Russian Federation); ORCID: 0000-0003-3505-9371; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Поступила в редакцию 23.01.2025
Одобрено после рецензирования 20.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 622.24.06

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПИРОФОРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ, НА ПИРОФОРНУЮ АКТИВНОСТЬ

Хафизов Ильдар Фанилевич, Султанов Рифкат Мухатьярович, Спыну Евгений Андреевич, Галиахметов Эмир Айратович

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Причиной образования пирофорных отложений на поверхности оборудования при добыче, сборе, подготовке и транспортировке сернистой нефти является воздействие на железо и его окислы сернистого водорода, содержащегося в попутном нефтяном газе и парах нефти, а также элементарной серы и сернистого водорода, растворенного в ней.

Пирофорные отложения на поверхности оборудования представляют собой черный осадок в виде сажи и состоят из смеси продуктов сернисто-водородной коррозии — сернистых соединений железа, органических смолистых веществ и механических примесей.

С целью разработки эффективного экспресс-метода по испытанию пирофорных отложений на пирофорную активность проведено сопоставительное исследование по двум методам:

а) определение пирофорной активности отложений согласно «Инструкции по борьбе с пирофорными соединениями при эксплуатации и ремонте нефтезаводского оборудования», утвержденной Миннефтехимпромом СССР от 18.12.1974;

б) определение пирофорной активности отложений по модернизированному методу, разработанному авторами.

Предложенный способ позволяет получить количественную оценку пирофорной активности испытуемых образцов пирофорных отложений, отобранных из резервуаров для хранения сернистых и высокосернистых нефтей и нефтепродуктов. Кроме того, практическое использование этого метода кратно сокращает время определения пирофорной активности, а также упрощает процедуру подготовки образцов к испытанию.

Ключевые слова: пирофорные отложения в резервуарах для хранения нефти, температура саморазогрева, температура самовоспламенения, метод определения пирофорной активности, модифицированный метод определения пирофорной активности

Для цитирования: Разработка модифицированного метода испытания образцов пирофорных отложений, сформировавшихся в резервуарах для хранения серосодержащих нефтей и нефтепродуктов, на пирофорную активность / И. Ф. Хафизов [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 127–135.

THE DEVELOPMENT OF THE MODIFIED METHOD FOR TESTING SAMPLES OF PYROPHORIC DEPOSITS FORMED IN STORAGE TANKS FOR SULFUR-CONTAINING OILS AND PETROLEUM PRODUCTS FOR PYROPHORIC ACTIVITY

Ildar F. Khafizov, Rifkat M. Sultanov, Evgeny A. Spynu, Emir A. Galiakhmetov
Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The reason for the formation of pyrophoric deposits on the surface of equipment during the extraction, collection, preparation and transportation of sulfurous oil is the effect on iron and its oxides of hydrogen sulfide contained in associated petroleum gas and oil vapors, as well as elemental sulfur and hydrogen sulfide dissolved in it.

Pyrophoric deposits on the surface of equipment are black soot-like sediments and consist of a mixture of hydrogen sulfide corrosion products – iron sulfide compounds, organic resinous substances and mechanical impurities.

In order to develop an effective express method for testing pyrophoric deposits for pyrophoric activity, this paper presents a comparative study using two methods:

a) determination of pyrophoric activity of deposits according to the "Instructions for Combating Pyrophoric Compounds during operation and repair of refinery equipment", approved by the USSR Ministry of Oil and Chemical Industry on December 18, 1974;

b) determination of pyrophoric activity of deposits according to the modernized method developed by the authors.

The proposed method makes it possible to obtain a quantitative assessment of the pyrophoric activity of the tested samples of pyrophoric deposits taken from storage tanks for sulfurous oils and petroleum products. In addition, the practical use of this method significantly reduces the time for determining pyrophoric activity, as well as simplifies the procedure for preparing samples for testing.

Keywords: pyrophoric deposits in oil storage tanks, self-heating temperature, self-ignition temperature, method for determining pyrophoric activity, modified method for determining pyrophoric activity

For Citation: The development of the modified method for testing samples of pyrophoric deposits formed in storage tanks for sulfur-containing oils and petroleum products for pyrophoric activity / I. F. Khafizov et al. // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 127–135.

Введение

Пирофорные отложения, образующиеся на стенках резервуаров при хранении в них сернистых нефтей и нефтепродуктов, являются смесью механических примесей, смолистых веществ, а также продуктов как органического происхождения, так и сероводородной коррозии-сульфидов железа [1–8].

Основу активных пирофоров составляют сульфиды, способные к самовоспламенению при окислении кислородом воздуха. Поскольку указанные соединения находятся в емкости и контактируют с горючими и взрывоопасными углеводородами, становится оче-

видным, что появление источника зажигания является одной из серьезных причин повышения взрывопожароопасности на объектах нефтедобычи и нефтепереработки.

В связи с этим особую значимость приобретает внедрение методов, позволяющих быстро и объективно определить уровень пирофорной активности.

Методология

Определение пирофорной активности отложений производилось согласно Инструкции по борьбе с пирофорными соединениями при эксплуатации и ремонте

нефтезаводского оборудования, утвержденной Миннефтехимпромом СССР 18.12.1974.

Описание методики испытаний. Испытание образцов на пирофорную активность проводится в приборе, представленном на рисунке ниже. Фильтр Шотта 2 и змеевик 1

изготовлены с «рубашкой», необходимой для поддержания постоянной температуры в приборе, и подсоединены силиконовыми шлангами к термостату. Перед началом каждого испытания система заполняется аргоном.

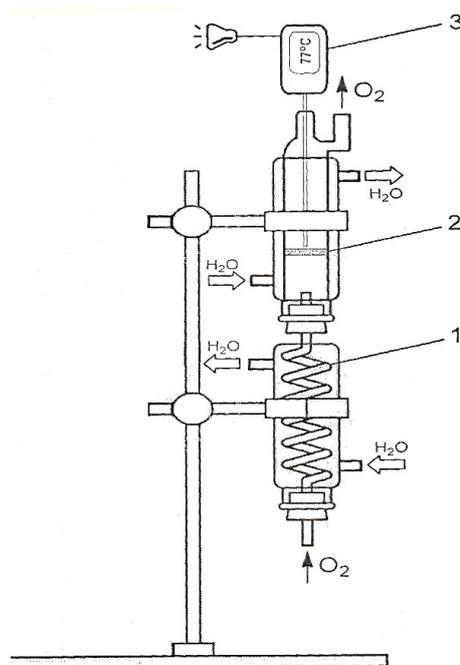


Рис. Схема установки по испытанию коррозионных отложений на пирофорность: 1 — стеклянный змеевик для подогрева или охлаждения газа-окислителя кислорода; 2 — фильтр Шотта; 3 — вплавленная пористая пластинка толщиной 5 мм и электронный термометр

Fig. Diagram of a pyrophoric corrosion deposit testing facility: 1 — a glass coil for heating or cooling oxygen oxidizer gas; 2 - a Schott filter; 3 — a 5 mm thick fused porous plate and an electronic thermometer

После просушки испытуемый образец массой $3,4 \pm 0,3$ г через верхний штуцер фильтра вносится в прибор. После этого в штуцер вставляется электронный термометр 3 со звуковой сигнализацией, срабатывающей при достижении заданного температурного порога. Испытание коррозионных отложений для оценки их пирофорных свойств производится путем подачи чистого кислорода через нижний штуцер змеевика в фильтр-воронку со скоростью 0,2–0,3 л/мин. Измерение и установление

скорости потока кислорода осуществляется дозировочным реометром.

Технический кислород из баллона очищается пропусканием через систему последовательно соединенных колонок, заполненных концентрированной H_2SO_4 , твердыми гранулами NaOH и молекулярными ситами марки 4A.

Процедура испытания образцов на пирофорность. Перед испытанием образцы коррозионных отложений, находящиеся в склянках, закрытых притертыми пробками,

подвергали пробоподготовке: под током инертного газа аргона переносили в фарфоровую чашу, где также в атмосфере аргона посредством ступки измельчали до кашеобразного состояния. Следующий этап пробоподготовки представлял собой сушку образца. Для этого небольшую часть измельченного образца (около 4–5 г) посредством шпателя вносили в колбу, предварительно заполненную аргоном, но прежде ее дно застилали в 2–3 слоя фильтровальной бумагой для впитывания воды и остатков нефтепродукта, смачивающих образец. По истечению небольшого времени (20–30 мин) фильтровальную бумагу вынимали, колбу закрывали пробкой, через которую пропускали две стеклянные трубки. Через первую, достигающую до дна, подавался аргон, который, выходя через вторую, выводил пары воды и нефтепродукта. Во время пропускания аргона колбу с образцом нагревали на бане до 80 °С, постепенно увеличивая температуру до 100 °С. Сушку образцов проводили в течение 4 часов, после чего образец осторожно (в токе аргона) измельчали до порошкообразного состояния и пересыпали в прибор для испытания образца на пирофорность.

Аргон из баллона марки «А», применяемый при пробоподготовке образцов, предварительно очищали пропусканием через прибор «Поглотитель газов», состоящий из пяти последовательно соединенных стеклянных колонок с электрическим подогревом. Первая, четвертая и пятая колонки заполнены оксидом алюминия (Al_2O_3) и молекулярными ситами марки 4А, которые служат для удаления примесей: воды, углекислого газа (CO_2) и органических веществ. Вторая и третья колонка заполнены никелевым катализатором для очистки аргона от примесей кислорода.

Исследования образцов на пирофорную активность проводились при температурах среды от 10 до 95 °С. Для некоторых образцов обозначенный интервал был увеличен до 180 °С. Температурный режим испытания задавался термостатом. Так, 10–20 °С получали охлаждением воды льдом, а 20–95 °С — нагреванием дистиллированной воды. Температуру свыше 95 °С получали заменой воды в термостате на глицерин ($t_{кип} = 290$ °С). Разность отметок в термостате и в приборе не превышала 1 °С.

Взаимодействие пирофорных соединений железа, содержащихся в коррозионных отложениях, с кислородом происходит с сильным разогреванием, поэтому подъем температуры в объеме образца выше температуры испытания (100–150 °С согласно инструкции) свидетельствует о его пирофорной активности. Для интервалов 10–95 °С, 95–145 °С и 145–180 °С температурный порог звуковой сигнализации задавали 100, 150 и 200 °С соответственно.

Результаты

При выполнении работ первого этапа на пирофорную активность были проверены шесть образцов пирофорных отложений, отобранных с разных мест аварийного объекта после взрыва газозвушной смеси.

Результаты испытаний образцов пирофорных отложений приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1., все образцы были проверены на пирофорную активность при температурах от 10 до 180 °С. При этом саморазогрев образцов не наблюдался.

На основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что все исследуемые образцы, испытанные по методу Миннефтехимпромом СССР, в стан-

Таблица 1
Результаты испытаний образцов пирофорных отложений
 Table 1
 Test results of sediment samples

Шифр образца The cipher of the sample	Образец Sample	Температура испытания, °С Test temperature, °C	Температура разогрева, °С Heating temperature, °C
Проба № 1 Sample № 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-6 Deposits from the inner surface of the RVS-6 gas discharge line	10–180 °C	—
Проба № 2 Sample № 2	Отложения с каре РВС-5000, № 5 Deposits from the RVC-5000 quarry, № 5	10–180 °C	—
Проба № 3 Sample № 3	Отложения, отобранные на подходе к РВС-5000, № 5 Sediments selected on the approach to RVS-5000, № 5	10–180 °C	—
Проба № 4 Sample № 4	Отложения с кровли РВС Deposits from the roof of the RV	10–180 °C	—
Проба № 5 Sample № 5	Отложения с сегмента обечайки светового люка Deposits from the skylight shell segment	10–180 °C	—
Проба № 6 Sample № 6	Отложения с фрагмента прокладки крышки светового люка Deposits from a fragment of the skylight cover gasket	10–180 °C	—

дартных условиях не проявили пирофорной активности.

Испытание образцов отложений на пирофорность по модернизированному методу. Модернизированный метод испытания коррозионных отложений на пирофорность имеет две существенные особенности. Первая из них заключается в отсутствии стадии пробоподготовки, т. е. сушка образца и испытание на пирофорность про-

водятся в одном сосуде (one-pot процесс). Также важной особенностью является определение активности пирофорных отложений посредством температуры их самовоспламенения, а не саморазогревания (как в предыдущем методе).

Образцы, находящиеся в склянках, закрытых притертыми пробками, под током инертного газа аргона переносили в фарфоровую чашу, где также в атмосфере аргона

посредством ступки измельчали до кашеобразного состояния. Далее небольшую часть измельченного образца (около 3 г) с помощью шпателя вносили в термостойкий сосуд цилиндрической формы, который затем закрывали пробкой с тремя отверстиями. В первое отверстие вставляли стеклянную трубку, доходящую до дна сосуда и подающую газ-окислитель — кислород. Во второе — электронный термометр со звуковой сигнализацией, срабатывающей при достижении заданного температурного порога. Третье отверстие оставляли пустым, тем самым обеспечивая выход кислорода. Испытание образцов отложений для оценки их пирофорных свойств производится путем подачи чистого кислорода через стеклянную трубку со скоростью

0,2–0,3 л/мин. Во время пропускания кислорода сосуд с образцом нагревали на керамической плитке от 20 до 240 °С. Все образцы были проверены на пирофорную активность при температурах испытания от 20 до 200 °С.

Результаты испытаний образцов пирофорных отложений по модернизированному методу приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2., все образцы в температурном режиме испытания от 20 до 200 °С проявили пирофорные свойства. Причем температура самовозгорания образцов для каждой пробы практически одинакова и варьируется в пределах погрешности эксперимента.

Наиболее низкую температуру самовоспламенения показали проба № 1 — 172 (168) °С

Таблица 2
Результаты испытаний образцов пирофорных отложений по модернизированному методу

Table 2
Test results of sediment samples using the upgraded method

Шифр образца The cipher of the sample	Образец Sample	Температура самовоспламенения, °С Self-ignition temperature, °C
Проба № 1 Sample № 1	Отложения с внутренней поверхности газоотводной линии РВС-6 Deposits from the inner surface of the RVS-6 gas discharge line	172 (168)
Проба № 2 Sample № 2	Отложения с каре РВС-5000, № 5 Deposits from the RVC-5000 quarry, № 5	181 (185)
Проба № 3 Sample № 3	Отложения отобранные на подходе к РВС-5000, № 5 Sediments selected on the approach to RVS-5000, № 5	190 (187)
Проба № 4 Sample № 4	Отложения с кровли РВС Deposits from the roof of the RV	195 (191)
Проба № 5 Sample № 5	Отложения с сегмента обечайки светового люка Deposits from the skylight shell segment	177 (179)
Проба № 6 Sample № 6	Отложения с фрагмента прокладки крышки светового люка Deposits from a fragment of the skylight cover gasket	189 (193)

и проба № 5 — 1 772 (179) °С. Способность этих проб к самовоспламенению можно объяснить в основном содержащейся в них в большом количестве элементарной серы, а также присутствием сульфидов железа — наиболее реакционноактивных соединений по отношению к кислороду.

Проба № 2 самовоспламеняется в пределах температур 181–185 °С.

Проба № 3 показала пирофорную активность при 190 (187) °С.

Проба № 4 проявила пирофорность при температуре 195 (191) °С.

Температура самовоспламенения пробы № 6 зафиксирована при 189 (193) °С.

В условиях эксплуатации емкостей, осложненных образованием пирофорных отложений, при благоприятных условиях (достаточная толщина пирофорных отложений, прогрев крышки емкостей, достаточное (стехиометрическое) количество кислорода) прогрессирующий саморазогрев может привести к их самовоспламенению.

Преимущество испытания образцов на пирофорность по модернизированному методу заключается в том, что он значительно сокращает время проведения опытов, а ба-

зовая его часть не сильно отличается от метода Миннефтехимпрома СССР.

Поэтому представленный метод пригоден для определения температуры самовоспламенения различных твердых горючих материалов.

Выводы

В статье показана несовершенство методики, которая рекомендована Миннефтехимпромом СССР. Благодаря проведенному исследованию можно более точно определить пирофорную активность отложений, образующихся в результате сероводородной коррозии на стенках резервуаров для хранения сернистых и высокосернистых нефтей и нефтепродуктов.

Разработан новый способ определения пирофорной активности, который отличается от известного тем, что упрощает процедуру подготовки образцов к использованию, а также сокращает время определения их пирофорности. Предложено определять пирофорную активность по температуре самовоспламенения отложений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эткинс П. Физическая химия. М. : Мир, 1980. Т. 1. 570 с.
2. Киселева И. А., Огородникова Л. П. Термохимия минералов и неорганических материалов. М. : Научный мир, 1997. 225 с.
3. Кудинов В. А., Карташов Э. М. Техническая термодинамика. М. : Высшая школа, 2000. 261 с.
4. Термические константы веществ : справочник : в 10 вып. / АН СССР ; ВИНТИ ; под ред. В. П. Глушко. М. : [б. и.], 1981. 10 вып. 441 с.
5. Термические константы неорганических веществ / Э. В. Брицке [и др.]. М. ; Л. : изд-во АН СССР, 1949. 1012 с.

6. Справочник по теплофизическим свойствам веществ / под ред. Н. Б. Варгафтика. М. : Энергоиздат, 1955. 487 с.
7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : Наука, 1963. 372 с.
8. Варгафтик Н. Б. Теплопроводность газов и жидкостей. М. : изд-во стандартов, 1970. 412 с.

REFERENCES

1. Atkins P. Physical Chemistry. M. : Mir, 1980. T. 1. 570 p.
2. Kiseleva I. A., Ogorodnikova L. P. Thermochemistry of minerals and inorganic materials. M. : Nauchny Mir, 1997. 225 p.
3. Kudinov V. A., Kartashov E. M. Technical Thermodynamics. M. Vysshaya Shkola, 2000. 261 p.
4. Thermal constants of substances : reference book : 10 issues / Academy of Sciences of the USSR ; VINITI ; edited by V. P. Glushko. M. : [b. i.], 1981. 10 issues. 441 p.
5. Thermal constants of inorganic substances / E. V. Britske et al. M. ; L. : ed. of the Academy of Sciences of the USSR, 1949. 1012 p.
6. Reference book on thermophysical properties of substances / ed. by N. B. Vargaftik. M. : Energoizdat, 1955. 487 p.
7. Vargaftik N. B. Reference book on thermophysical properties of gases and liquids. M. : Nauka, 1963. 372 с.
8. Vargaftik N. B. Thermal conductivity of gases and liquids. M. : edition of standards, 1970. 412 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Султанов Рифкат Мухатьярович, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 49775; Scopus Author ID: 6701679307; e-mail: sultanov55@mail.ru

Спыну Евгений Андреевич, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: pkrb@mail.ru

Галиахметов Эмир Айратович, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); ResearcherID: rid10; e-mail: pkrb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, The Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Rifkat M. Sultanov, Dr. Sci. (Chemical), Professor, The Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 49775; Scopus Author ID: 6701679307; e-mail: sultanov55@mail.ru

Evgeny A. Spynu, Postgraduate student of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: pkpb@mail.ru

Emir A. Galiakhmetov, Postgraduate student at the Department of Fire and Industrial Safety of Ufa State Petroleum Technical University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation); ResearcherID: rid10; e-mail: pkpb@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2025
Одобрено после рецензирования 04.03.2025
Принята к публикации 14.03.2025

УДК 004.032.26

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ КАСКАДОМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Цветков Геннадий Александрович^{1,2}, Коковин Андрей Николаевич¹, Потураев Пётр Сергеевич²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация. В условиях стихийных бедствий чрезвычайно важно быстро и слажено выполнять работы по разборке завалов разрушенных зданий и сооружений в поиске пострадавших. Спасателям необходимо в кратчайшие сроки принимать одно из ключевых решений: какое здание необходимо исследовать в первую очередь. Кроме того, специалисты во время поиска людей и их спасения имеют высокий риск оказаться под обломками, что увеличивает сроки проведения подобных работ. Таким образом, в настоящей статье предлагается при проведении поисково-спасательных работ в условиях разрушенных зданий применять каскад нейронных сетей, предназначенный для обработки информации, получаемой от наземных и надземных роботов, с целью идентификации сооружений и зданий и дальнейшей оценки степени их разрушений, а также для обнаружения пострадавших. В рамках проведенного исследования была обучена классификационная нейронная сеть, предназначенная для распознавания зданий и сооружений по фото- и видеосъемке. Применение каскада нейросетей позволит сократить время проведения аварийно-спасательных работ и спасти как можно больше людей, находящихся под обломками металлических, бетонных и железобетонных конструкций.

Ключевые слова: поисково-спасательные работы, нейронная сеть, поиск пострадавших, разрушенное здание, идентификация зданий

Для цитирования: Цветков Г. А., Коковин А. Н., Потураев П. С. Идентификация зданий и сооружений каскадом нейронных сетей при проведении поисково-спасательных работ // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 136–152.

IDENTIFICATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES USING A CASCADE OF NEURAL NETWORKS DURING SEARCH AND RESCUE OPERATIONS

Gennadiy A. Tsvetkov^{1,2}, Andrey N. Kokovin¹, Petr S. Poturaev²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

Abstract. In the conditions of natural disasters, it is extremely to carry out important quickly and efficiently the work related to clearing the rubble of destroyed buildings and structures in search of victims. Rescuers must make one of the key decisions as soon as possible: which building

needs to be examined first. In addition, specialists have a high risk of being trapped under rubble during the search for people and their rescue, which increases the time it takes to carry out such work. Thus, this article proposes to use a cascade of neural networks for conducting search and rescue operations in conditions of destroyed buildings, designed to process information received from ground and above-ground robots (drones), in order to identify structures and buildings and further assess the extent of their destruction, as well as to detect victims. As part of the study, a classification neural network was trained to recognize buildings and structures from photos and videos. The use of a cascade of neural networks will reduce the time required for emergency rescue operations and save as many people as possible who are under the rubble of metal, concrete and reinforced concrete structures.

Keywords: search and rescue, neural network, search for victims, destroyed building, building identification

For Citation: Tsvetkov G. A., Kokovin A. N., Poturaev P. S. Identification of buildings and structures by a cascade of neural networks during search and rescue operations // *Technospheric safety*. 2025. № 1 (46). pp. 136–152.

Введение

Каждый год стихийные бедствия наносят значительный материальный ущерб инфраструктуре города, уносят большое количество человеческих жизней. Так, землетрясение в Турции и Сирии, произошедшее 6 февраля 2023 г., повлекло за собой разрушение целого города и смерть нескольких тысяч человек. Анализ научно-технической информации показал, что вероятность выживания человека под обломками здания спустя 72 часа снижается до 36,7 % [1]. В связи с этим перед спасателями стоит задача по поиску и дальнейшему деблокированию пострадавших в сжатые сроки, однако на скорость указанных процессов негативно влияют такие обстоятельства, как большая площадь зоны бедствия, опасные условия и сложность выполнения работ.

В работе До Хоанг Тхань [2] разработаны модели и алгоритмы поиска пострадавших при ЧС и пожарах с использованием беспилотных летательных аппаратов. На основе

анализа различных комплексных подходов планирования поисково-спасательных работ можно сделать вывод, что в них не рассмотрен вопрос идентификации зданий, определения степени их разрушения с помощью специально обученных нейронных сетей, которые могли бы помочь спасателям принять решение о том, какие здания необходимо исследовать в первую очередь [3].

В настоящей статье предлагается применять при проведении поисково-спасательных работ каскад нейронных сетей, которые будут обрабатывать информацию, полученную с наземной и надземной роботизированной техники, для дальнейшей оценки степени разрушения зданий и сооружений. Таким образом спасательные службы смогут осуществлять объективную оценку ситуации на месте проведения работ, что, в свою очередь, позволит более точно координировать дальнейшие действия, сократить сроки поиска и освобождения пострадавших, а также оптимизировать затраты на проведение подобных мероприятий.

Материалы и методы исследования

Существует множество наборов данных с открытым исходным кодом для изображений «небо-земля». Однако найти хорошо аннотированный набор данных аэросъемки, который можно применить для обучения нейросети, достаточно сложно. В рамках исследования были использованы материалы видеосъемок, взятых с международной платформы Kaggle.

Применяемый в нашем исследовании набор данных содержит более 5 000 маркированных изображений зданий и сооружений, полученных с дрона. Эти изображения имеют разрешение 1024×1024. В дальнейшем они были сжаты до разрешения 256×256. Преимуществом указанного набора данных является то, что все изображения помечены для обнаружения зданий и сооружений.

Для идентификации сооружений в зоне проведения спасательных работ применяется нейросеть *U-Net*. В качестве основы для обучения была выбрана библиотека *tensorflow*. Языком программирования стал *Python*. Подробнее о применении нейросети будет рассказано в следующем разделе.

Этапы проведения поисково-спасательных работ

При проведении мероприятий по поиску и спасению пострадавших существует высокая вероятность возникновения различных ситуаций, которые невозможно учесть при построении жестких алгоритмов. Следовательно, можно утверждать, что разработать точную последовательность действий, затрагивающую все аспекты проведения спасательных работ, не пред-

ставляется возможным [4]. Таким образом, этапы, изложенные ниже, следует считать условными.

На основе анализа существующих методов проведения поисково-спасательных работ [5, 6] выполнение работ можно разделить на несколько этапов. Каждый этап — это целый комплекс действий, выполняемых в процессе спасательных операций. В зависимости от масштаба и вида происшествия некоторые из них исключаются или объединяются в один. Этапы проведения поисково-спасательных работ схематично представлены на рис. 1.

Алгоритм проведения поисково-спасательных работ

1 этап. Поступление первых сведений

Операции по спасению людей начинаются с момента поступления первых сообщений о реальной или возможной ЧС. На начальном этапе сбора информации (масштаб бедствия, примерное количество пострадавших и т. д.) приоритетным источником являются сами участники происшествия, находящиеся в зоне бедствия. Любые сведения, полученные до начала или в процессе спасательной операции, подвергаются тщательной проверке. При невозможности своевременно подтвердить достоверность информации должны выполняться действия по подготовке к проведению операции.

2 этап. Подготовка

Второй этап предполагает оповещение и выдвижение спасательных формирований в зону ЧС в случае верификации полученной ранее информации. Основные действия на этом этапе:

- назначается координатор поисково-спасательной операции;

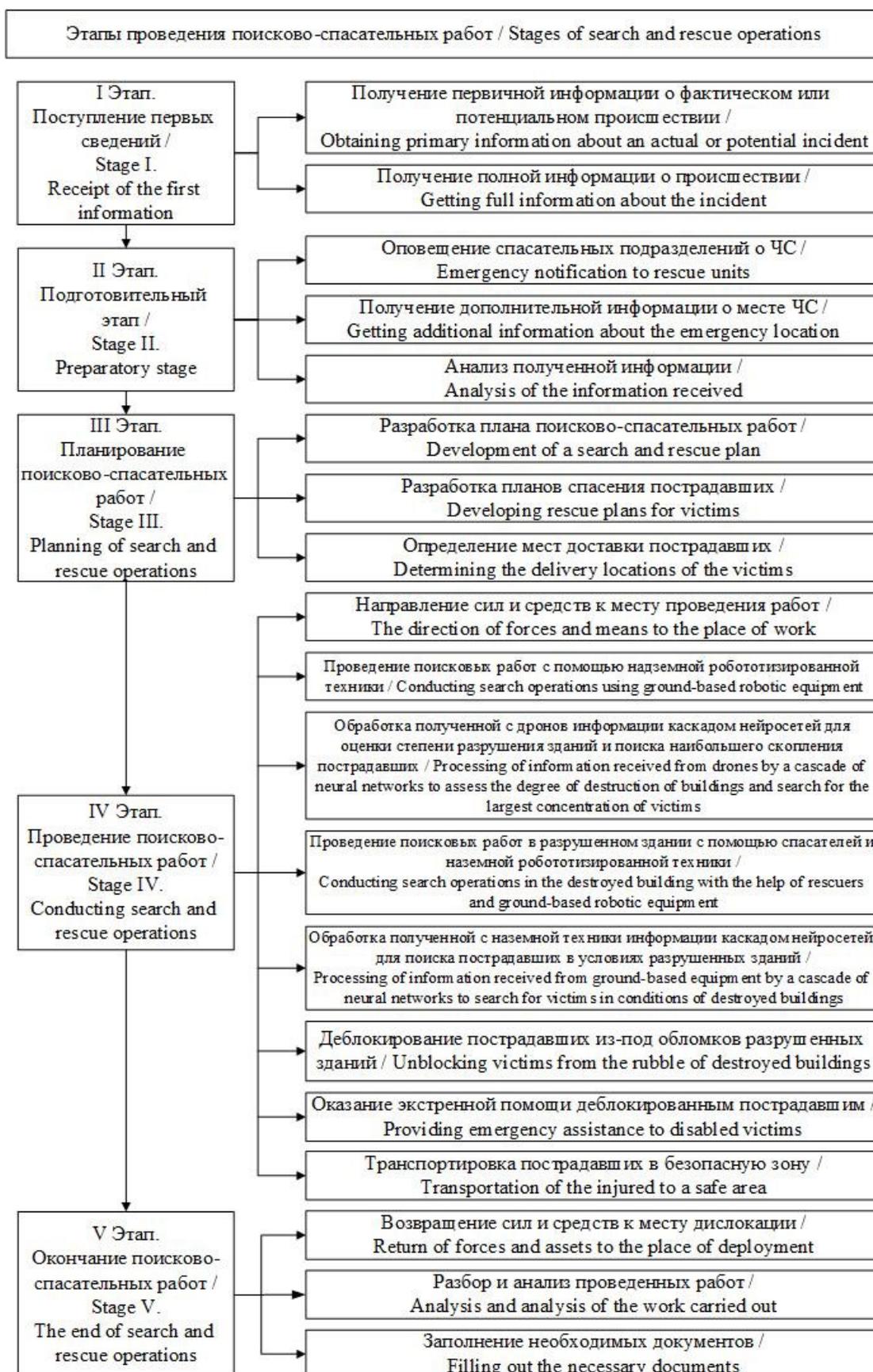


Рис. 1. Этапы проведения поисково-спасательных работ

Fig. 1. Stages of search and rescue operations

- выполняется оценка происшествия;
- проводится информирование поисковых подразделений;
- осуществляется поиск дополнительных данных.

3 этап. Планирование поисково-спасательных работ

Основная цель при составлении плана проведения поисково-спасательных работ — спасение пострадавших в кратчайшие сроки и ликвидация последствий происшествия. Эффективность планирования зависит от грамотной координации действий различных служб и ведомств, которые будут участвовать в поисково-спасательных работах. При составлении плана предусматривается четкое распределение обязанностей, определяется предварительное количество разрушенных зданий, обозначаются примерные пути подъезда и эвакуации. Один из ключевых аспектов, который учитывается при планировании спасательных работ, — определение наиболее вероятного скопления пострадавших и способов их эвакуации в ближайшие действующие медицинские учреждения или безопасные зоны.

Для повышения эффективности спасательных формирований выполняется постоянное обновление и корректировка составленного плана на основе дополнительной информации, полученной в ходе проведения поисково-спасательных работ.

4 этап. Проведение поисково-спасательных работ

4.1. Определение степени разрушения зданий в зоне бедствия

На этом этапе службы спасения выдвигаются к месту происшествия. Специалистам необходимо в кратчайшие сроки определить точное количество зданий и сооружений, которые находятся в зоне проведения

поисковых работ. Знание точных границ района поиска позволит спасателям определить районы обнаружения пострадавших, рациональное размещение спасательной техники, пунктов сбора и т. д.

Систематически определить точные границы проведения спасательных работ в масштабах целого города практически невозможно. Для обозначения границ района поиска в настоящее время используется группа дронов, которая перемещается в воздушном пространстве, учитывая наличие неподвижных и подвижных препятствий, а также беспилотные летательные аппараты, управляемые спасателями-операторами, и другая наземная летательная техника, например вертолеты [7, 8].

На основе информации, полученной от наземной техники, спасателями создается вероятностная карта. При ее составлении учитываются объемы и степень повреждения зданий и сооружений, зоны наиболее вероятных мест скопления пострадавших и распределение сил для их дальнейшего спасения.

Таким образом, нетрудно сделать вывод, что при крупных стихийных бедствиях складывается сложная инженерная, медицинская и пожарная обстановка. Спасателям требуется в кратчайшие сроки определить первостепенные зоны выполнения поисково-спасательных работ. Неточность в принятии решения может повлечь за собой гибель пострадавших из-за несвоевременно оказанной экстренной медицинской помощи. Для обеспечения поддержки принятия управленческих решения предлагается использовать каскад нейронных сетей, которые будут в режиме реального времени обрабатывать данные, получаемые в формате видеоряда с летательных аппаратов,

и определять границы спасательных работ и степень разрушения зданий и сооружений. Для указанных целей нейронную сеть необходимо обучить идентифицировать строения, находящиеся в изучаемой области.

В исследовании применялась нейросеть *U-Net* с классификатором *VGG16* для оценки степени разрушения идентифицированных ранее зданий и маркировки их следующим образом:

- разрушенные здания — красным цветом;

- полуразрушенные здания — желтым цветом;
- не подверглись разрушению — зеленым цветом.

Пример маркировки зданий и сооружений представлен на рис. 2.

Таким образом, благодаря информации, полученной от каскада нейронных сетей, спасатели способны решить одну из ключевых задач при проведении поисково-спасательных работ — определение зданий, которые необходимо исследовать в первую

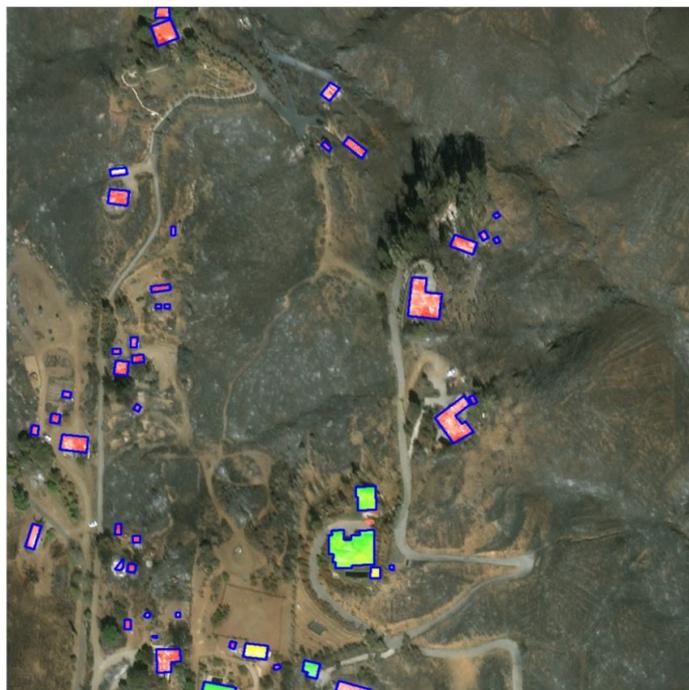


Рис. 2. Пример маркировки зданий и сооружений нейросетью *U-Net*
Fig. 2. Example of marking buildings and structures using *U-Net* neural network

очередь. При принятии решений спасателями учитываются такие факторы, как размер здания; количество людей, которые могли оказаться внутри зданий в момент разрушения; степень разрушения зданий.

4.2. Поиск пострадавших под завалами разрушенного здания

При поиске людей спасатели в первую очередь должны исключить ситуации, кото-

рые могут угрожать их жизни и здоровью. Так, прежде чем проводить поисково-спасательные работы, необходимо учитывать состояние сохранившихся строительных конструкций, нависающих элементов стен, а также возможные пути эвакуации из опасной зоны.

Поиск пострадавших в условиях разрушенных зданий представляет собой сово-

купность действий спасателей и роботов с обученной нейронной сетью [9, 10], направленных на выявление условий их нахождения и функционального состояния, установление с ними звукового или визуального контакта и определение примерного объема и характера необходимой помощи.

4.3. Деблокирование пострадавших из-под обломков строительных конструкций

Спасательные работы по деблокированию людей из-под металлических, бетонных и железобетонных обломков являются весьма опасными и трудоемкими, т. к. занимают большое количество времени и к процессу привлекается большое количество спасателей и техники. Например, используется различное оборудование для резки и дробления металлических и железобетонных конструкций, которое, в свою очередь, различается по принципу действия, скорости и условиям применения. Во время работы с такой техникой специалистам необходимо учитывать возможные перемещения и осадки разрушенных строительных конструкций, что может усугубить положение людей под завалами.

После деблокирования пострадавшего, находящегося длительное время без движения в замкнутом пространстве с дефицитом кислорода, необходимо оказать ему экстренную медицинскую помощь.

4.4. Экстренная медицинская помощь пострадавшим

Оказание медицинской помощи людям, деблокированным из-под обломков строительных конструкций, в первые часы позволяет снизить их смертность примерно на 25–30 % [11]. После оказания первой помощи пострадавших эвакуируют до пункта сбора. Способ эвакуации зависит от состояния человека, окружающей обста-

новки, имеющейся техники для транспортировки, а также протяженности и сложности пути.

5 этап. Окончание поисково-спасательных работ

На последнем этапе спасательные службы и техника возвращаются в места их дислокации, где проводятся опрос спасателей, подготовительные работы оборудования и оснащения к другим операциям, а также оформление всех необходимых документов.

Идентификация зданий и сооружений с помощью нейронных сетей

Рассмотрим принцип действия нейронной сети при идентификации зданий и сооружений во время проведения поисково-спасательных работ.

При передвижении дронов по городу, пострадавшему от стихийных бедствий, необходимо идентифицировать здания и сооружения для дальнейшего определения степени их разрушения. Для этого необходимо обучить нейронную сеть с помощью первого и вспомогательного этапов анализа изображений в рамках использования нейросетей сегментационного и классифицирующего типов [12, 13].

Сегментационная нейросеть, используемая в настоящем исследовании, базируется на передовой архитектуре сверточной сети. За базовый тип архитектуры этой нейросети была взята модель нейронной сети *U-Net*, архитектура которой представлена на рис. 3.

Архитектура нейронной сети *U-Net* в общем виде имеет 23 сверточных слоя и состоит из следующих частей [14].

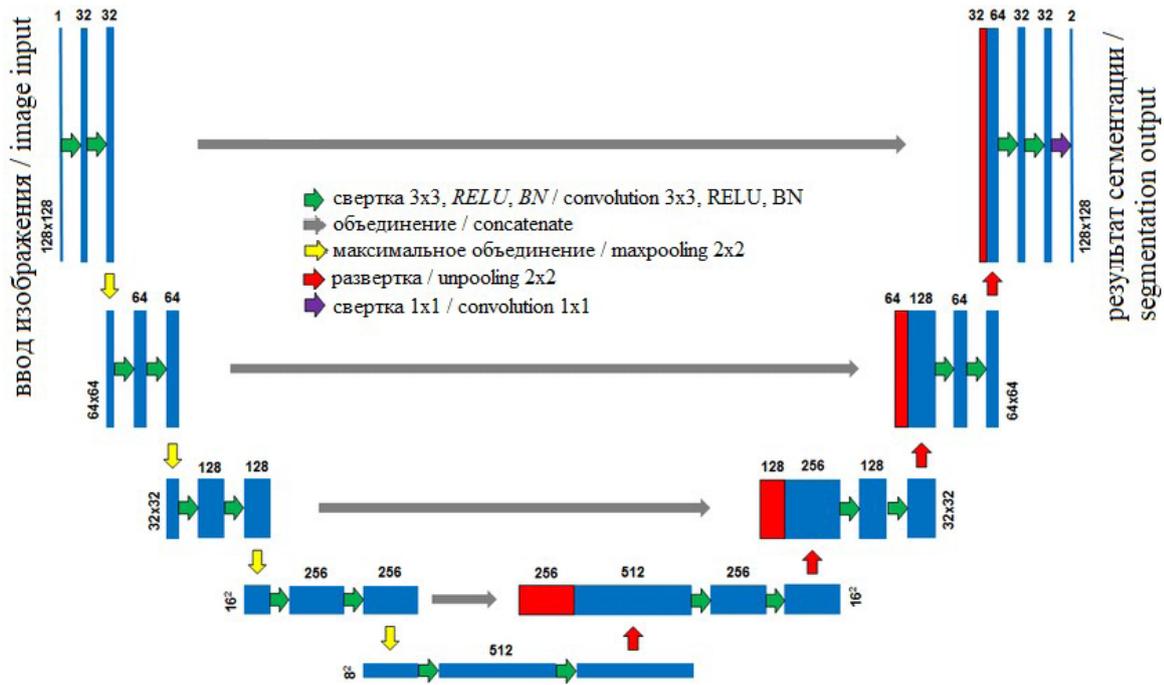


Рис. 3. Архитектура нейронной сети *U-Net*
 Fig. 3. *U-Net* neural network architecture

- Сужающий путь, в результате которого выполняется повторное применение двух сверток 3×3 (левая часть рис. 2). Обозначенный фрагмент является типичным для архитектуры сверточной нейронной сети. Каждый слой представляет из себя итерацию применения двух сверток 3×3, за которыми следуют функция активации *ReLU* и операция максимального объединения (2×2 степени 2) для снижения размерности и увеличения количества каналов свойств.
- Расширяющий путь, в результате которого выполняется увеличение дискретизации карты признаков (правая часть рис. 2) с последующим уменьшением

количества каналов признаков вдвое и сопоставлением с картой признаков, обрезанной на соответствующем слое на пути сжатия. Таким образом, каждый шаг расширяющего пути описывается чередованием двух сверток 3×3 и последующей сверткой 2×2 и объединением с маской соответствующей размерности. На последнем слое реализуется свертка 1×1 для сопоставления каждого 64-компонентного вектора свойств с известным количеством классов.

Функция активации *ReLU* является частично-линейной функцией, отсеивающей отрицательные входные значения, с приведением к 0. Математически она может быть описана следующим образом:

$$f(x) = \max(0, x), \tag{1}$$

где x — входное значение нейрона.

В математическом выражении функцию *ReLU* можно записать так:

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Основными преимуществами такой функции активации нейронов является простота и, что свойственно для активационных функций, нелинейность, стимуляция изучения моделью более сложных соотношений признаков. Производная функции *ReLU* упрощена, что значительно способствует избеганию проблемы исчезающего градиента, которая часто возникает при использовании других аналогичных функций, например функции сигмоиды.

Следует отметить, что последовательные этапы свертки входных тензоров на каждом слое нейронной сети в процессе обучения модели обеспечивают размерность выходного изображения меньше размерности входного тензора на постоянную ширину границы.

Окончательный расчет весового значения или энергии каждого отдельного пикселя реализует *soft-max* с функцией кросс-энтропии для оценки общей результирующей точности модели для конкретной эпохи обу-

чения. Оценкой качества обучения сегментационной модели, как правило, является показатель соответствия истинной карты признаков с предсказанным их набором, который рассчитывается исходя из набора весовых коэффициентов относительно заданного порогового значения для каждой точки выходного тензора после реализации функции *soft-max* последнего слоя модели.

Оценка точности нейросети в процессе обучения выполнялась методом пересечения по объединению (далее — *IOU*). *IOU*, известный в статистике как Индекс Жаккара, является одним из самых распространенных и используемых в машинном обучении для сравнения выборок данных.

На рис. 4 представлена схема соответствия истинной и предсказанной карт признаков, где объект А — истинный признак, В — предсказанный признак, С — пересечение признаков А и В.

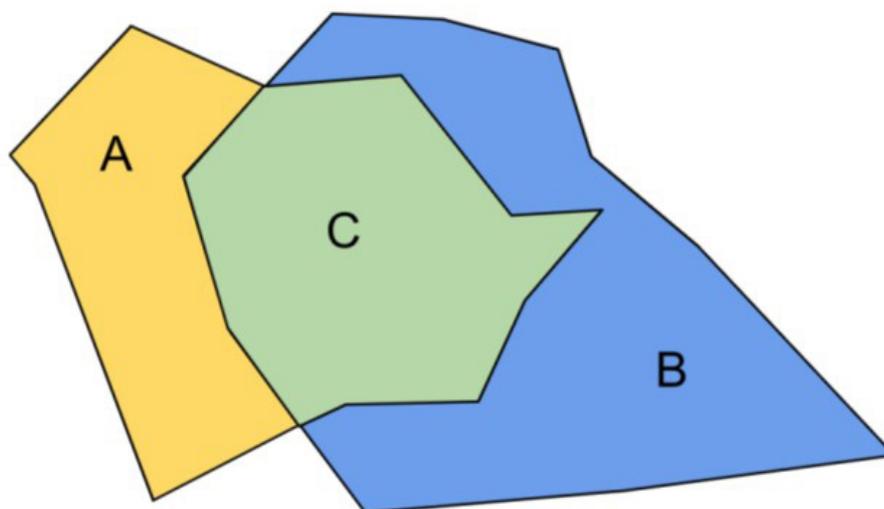


Рис. 4. Схема соответствия истинной и предсказанной карт признаков

Fig. 4. The scheme of matching the true and predicted feature maps

Показатель IOU отражает отношение площади области пересечения двух признаков к их суммарной площади.

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|}. \quad (3)$$

Таким образом, точность сегментационной нейросети определяется относительной величиной соответствия указанных признаков. Следовательно, чем выше значение IOU , тем выше точность модели. Однако в рамках проведенного исследования возникла необходимость несколько отступить от строгости применения метрики в чистом виде, опираясь на допущение, что данный показатель имеет непосредственную важность при оценке качества обучения нейросети, но гораздо более важным будет являться показатель значения функции расчета потерь на каждой эпохе обучения. Исходя из этого предположения, ожидается нивелирование такого явления, как гибель нейронов, означающее их полную необучаемость, в результате падения показателя весового градиента на последнем слое модели.

Результаты проведенного исследования

Таким образом, в рамках исследования классификационная нейросеть была обучена распознаванию зданий и сооружений в городских условиях с помощью 5 598 изображений, полученных с дрона. Для обучения нейросети была реализована модель каскадной нейронной сети с двумя этапами преподготовки данных. Перед началом обучения осуществлялась ручная разметка

Математическое выражение для его расчета можно представить в следующем виде:

элементов на изображении, выделенная на рис. 5 красным цветом (True mask), в результате чего были созданы тренировочная, валидационная и тестовая выборки.

Исходя из изображения на рис. 5, можно утверждать, что нейросеть способна идентифицировать здания и сооружения, выделяя их синим цветом (Predict mask). Однако можно заметить, что ей не удалось распознать все обозначенные нами ранее объекты. Это связано с низким качеством снимков и некорректной разметкой зданий и сооружений. Следовательно, для повышения точности нейросети в дальнейшем следует устранить указанные недоработки. Процесс обработки полученных изображений нейронной сетью представлен на рис. 6.

Обучение нейронной сети идентификации зданий и сооружений проводилось в 150 эпох, процесс которого зафиксирован в табл. 1.

Для наглядности построим графики, отображающие зависимость точности нейронной сети от эпохи обучения и значений функции потерь от эпохи обучения (рис. 7 и рис. 8).

Как упоминалось ранее, в рамках проведенного исследования главенствующим показателем при оценке точности нейронной сети было принято считать не IOU , а относительную величину значения функции потерь для каждой эпохи обучения. Однако следует заметить, что показатель IOU также

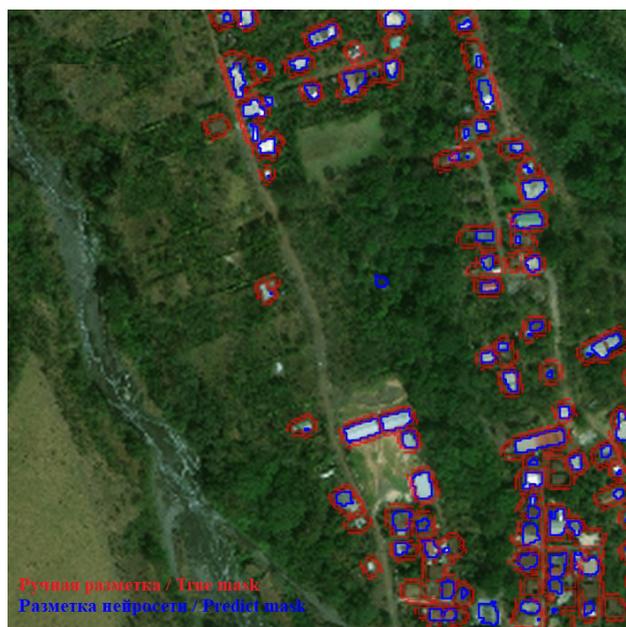


Рис. 5. Идентификация зданий и сооружений нейронной сетью *U-Net*
 Fig. 5. Identification of buildings and structures using the *U-Net* neural network

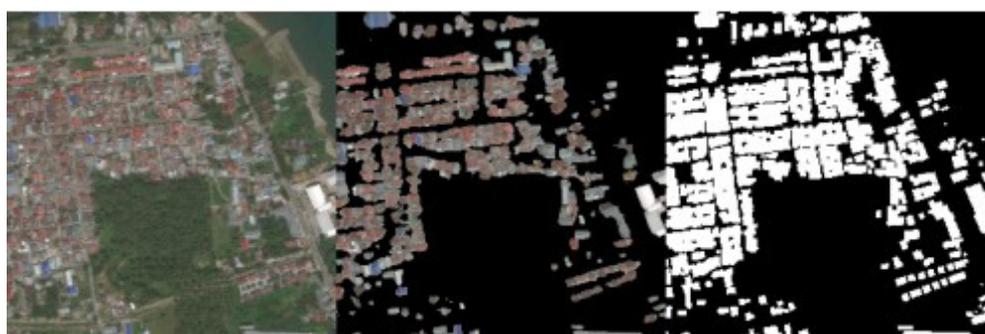


Рис. 6. Процесс обработки полученных изображений нейронной сетью
 Fig. 6. The process of processing the obtained images by a neural network

Таблица 1
Процесс обучения нейронной сети идентификации зданий и сооружений
 Table 1
 The process of training a neural network for identifying buildings and structures

эпохи / epochs	точность при тренировочной выборке / train_accuracy	точность при валидационной выборке / valid_accuracy	потери при тренировочной выборке / train_loss	потери при валидационной выборке / valid_loss
0	0,00023978587705641985	0,0	0,3635801374912262	0,20522959530353546
10	0,28776708245277405	0,276297926902771	0,11876539140939713	0,11973557621240616
20	0,39333680272102356	0,38124880194664	0,10389135032892227	0,15303964912891388
30	0,4415116310119629	0,4460066854953766	0,09400739520788193	0,05703793838620186
40	0,46043482422828674	0,4404538571834564	0,08348678052425385	0,07230939716100693

Окончание таблицы 1

эпохи / epochs	точность при тренировочной выборке / train_accuracy	точность при валидационной выборке / valid_accuracy	потери при тренировочной выборке / train_loss	потери при валидационной выборке / valid_loss
50	0,4788987338542938	0,5198475122451782	0,08415922522544861	0,09057263284921646
60	0,4988674521446228	0,37258729338645935	0,08028594404459	0,05913066864013672
70	0,5018420219421387	0,5469757914543152	0,07852476090192795	0,09513348340988159
80	0,5096812844276428	0,5683957934379578	0,07582996785640717	0,07011069357395172
90	0,5168203115463257	0,5536920428276062	0,07439229637384415	0,06412428617477417
100	0,5182840824127197	0,47873955965042114	0,08162997663021088	0,1348419189453125
110	0,5360461473464966	0,5613406300544739	0,07261865586042404	0,08617696911096573
120	0,5353367328643799	0,5766665935516357	0,07220753282308578	0,048485927283763885
130	0,5486199259757996	0,5682351589202881	0,07037948071956635	0,06311243027448654
140	0,5413098931312561	0,5658076405525208	0,06851591914892197	0,06111401319503784
149	0,5520762205123901	0,5459949970245361	0,06929425150156021	0,08435392379760742

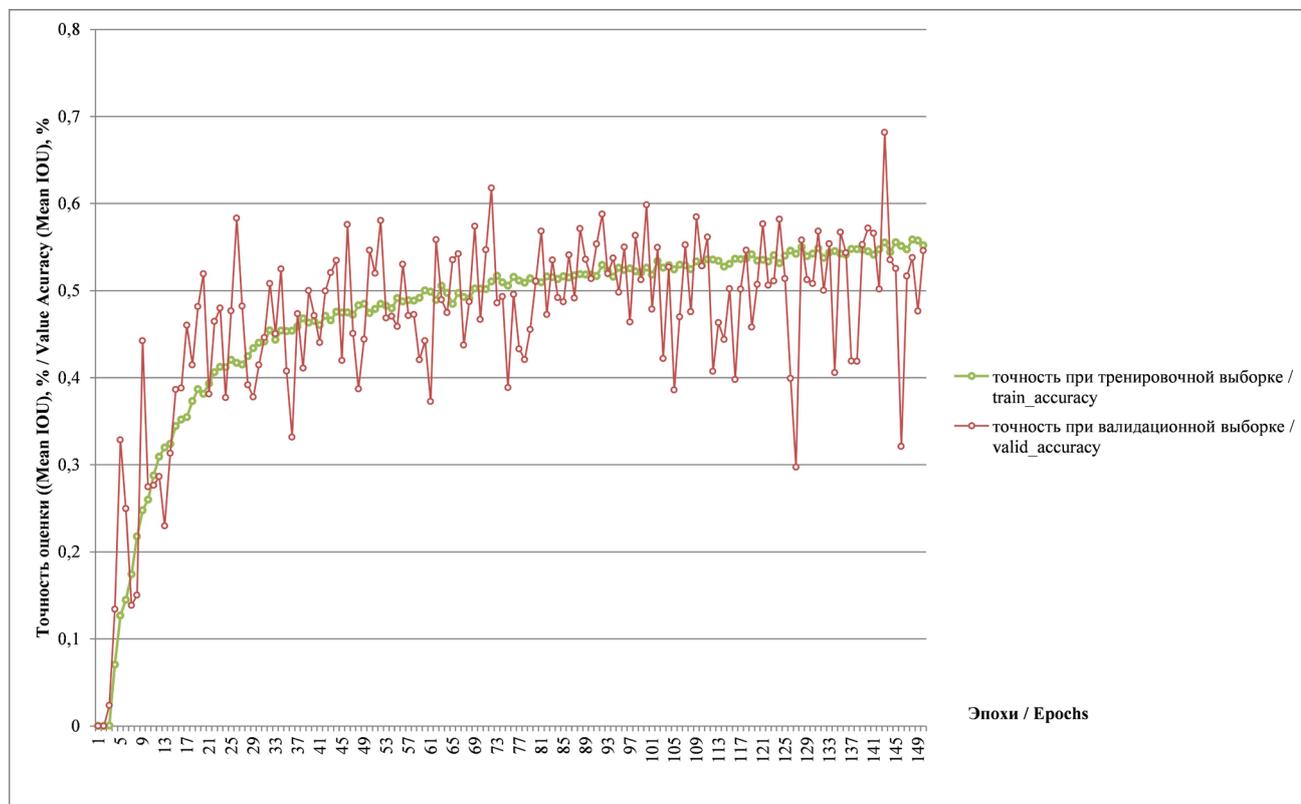


Рис. 7. График зависимости показателя MeanIoU от эпохи обучения
 Fig. 7. Graph of the dependence of the MeanIoU indicator on the training epoch

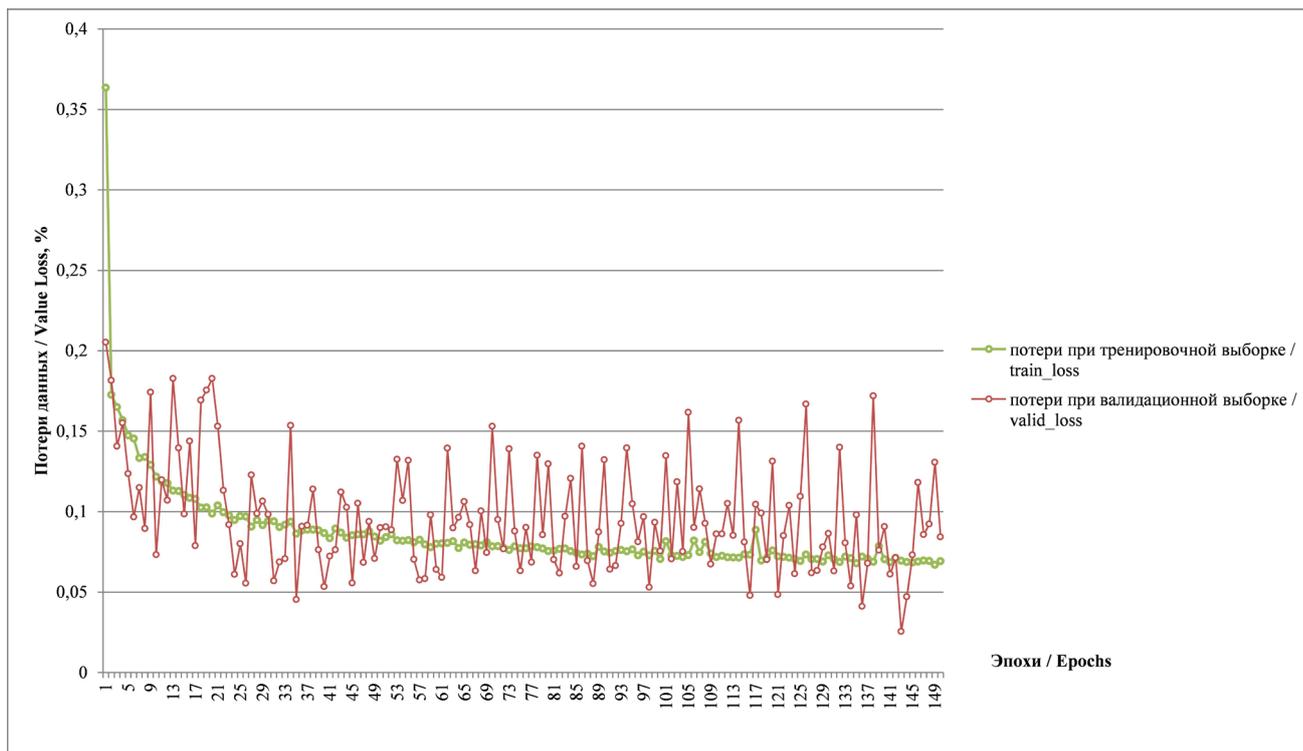


Рис. 8. График зависимости функции потери от эпохи обучения
 Fig. 8. Graph of the dependence of the loss function on the training epoch

учитывался с целью избегания переобучения модели. Таким образом, контрольной точкой при оценке точности обучения в процессе мы считали оптимальным соотношение сразу двух показателей.

Такой подход был выбран на том основании, что более ранние эксперименты, основанные на классическом методе оценки точности нейросети по значению *IOU*, показывали отрицательные результаты. Это было вызвано в первую очередь специфичностью данных, а именно высокой загруженностью истинных карт признаков в совокупности с высокой однородностью исходных сведений, что вело к снижению точности *IOU* при обучении модели на фоне увеличения показателя весового градиента и тем самым способствовало переобучению модели.

Выводы

В результате обучения нейронной сети идентификации зданий и сооружений максимальная точность распознавания объектов составила 68 % на 143 эпохе обучения из 150. При анализе графиков можно заметить (рис. 7 и рис. 8), что рассмотренный подход способствует увеличению скорости обучения. Так, в диапазоне 5–10 эпох обучения наблюдается значительный прирост точности нейронной сети по метрике *IOU* и снижение значения функции потерь, а также плавный переход обеих зависимостей на ярко выраженное плато, что говорит о сохранении показателя весового градиента между эпохами и, как следствие, избегании явления переобучения модели.

Данные, получаемые на первом подэтапе, передаются на следующий, а именно на определение степени разрушения зданий и сооружений нейронной сетью *U-Net* с классификатором *VGG16*, обучению которой будет посвящено дальнейшее исследование.

Таким образом, в настоящей статье рассмотрена структура проведения поисково-спасательных работ с применением

каскада нейросетей, предназначенных определять степень разрушения зданий и границы зон проведения поисковой операции. Благодаря полученной информации удастся сократить время принятия специалистами управленческих решений, что позволит ускорить процесс выполнения поисково-спасательных работ и увеличить количество спасенных людей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабанов О. В., Журавлева Л. А. Машины и оборудование для ликвидации последствий ЧС: краткий курс лекций для студентов направления подготовки 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы. Саратов : СГАУ, 2015. 109 с.
2. До, Хоанг Тхань, Топольский, Н. Г., Мокшанцев, А. В. Модель и алгоритм поиска пострадавших при чрезвычайных ситуациях и пожарах с использованием диаграммы Вороного // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 4 (86). DOI: <http://doi.org/10.25257/TTS.2019.4.86.53-61>.
3. Мокшанцев А. В., Береснев Д. С. Комплексный подход при планировании поисково-спасательных работ // Материалы V междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности — 2016». М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. 382 с.
4. Руководство по международному авиационному и морскому поиску и спасанию. ИМО, ICAO. Любое издание, том 1, 2, 3. International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual. IMO, ICAO. Any edition, volume 1, 2, 3.
5. Мокшанцев, А. В., Топольский, Н. Г., До, Тхань Хоанг. Модель информационной системы поддержки принятия управленческих решений при проведении поисковых работ в условиях пожара // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности : сб. тезисов докладов междунар. науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 543–547. DOI: <http://doi.org/10.25257/TTS.2019.4.86.53-61>.
6. Напольских, М. Л. Ремесло спасателя. Поисково-спасательные работы в природной среде. Архангельск, 2011. 194 с. URL: https://aocc.ru/wp-content/uploads/downloads/2012/11/Napolskih_SAR.pdf (дата обращения: 03.03.2025).
7. Юдинцев, Б. С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 163–186. DOI: <http://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10406>.
8. Zenkevich, S. L., Nazarova, A. V., Huo Jianwen. Formation Control of Ground Multi-agent System Using Quadcopter with Camera // In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New

Intelligent Control Paradigms. *Studies in Systems, Decision and Control*, Springer. 2020. Vol. 272. pp. 113–124. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_9.

9. Dousai, N. M. K., Lončarić, S. Detecting humans in search and rescue operations based on ensemble learning // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. pp. 26481–26492. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3156903>.

10. Hakimy Salem, M. S., Kamaru Zaman, F. H., Tahir, N. Md. Human detection implementation on UAVs in search and rescue operation // *Journal of Electrical & Electronic Systems Research*. 2021. Vol. 18. pp. 70–76. DOI: <http://doi.org/10.24191/jeesr.v18i1.012>.

11. Аварийно-спасательные работы в условиях разрушенных зданий. Особенности технологии, организации и управления : монография / С. П. Чумак ; МЧС России. М. : ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. 232 с.

12. Порошин, И. Е., Титов, М. А. Использование искусственных нейронных сетей для параметрической идентификации объектов // *Молодой учёный*. 2020. № 26 (316). С. 39–42. URL: <https://moluch.ru/archive/316/72192/> (дата обращения: 02.03.2025).

13. Simonyan, K., Zisserman, A. Very Deep Convolutional Net-works for Large-Scale Image Recognition // *Cornell University : website*. URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (date of application: 02.03.2025).

14. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, 5–9 October 2015*. Berlin : Heidelberg : Springer, 2015. Vol. 9351. pp. 234–241. DOI: <http://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.

REFERENCES

1. Kabanov O. V., Zhuravleva L. A. *Machines and equipment for emergency response: a short course of lectures for students of training direction 23.03.02 Land transport and technological complexes*. Saratov : SGAU, 2015. 109 p.

2. Do, Hoang Thanh, Topolsky, N. G., Mokshantsev, A. V. Model and algorithm of searching for victims in emergency situations and fires using Voronoi diagram // *Technosphere safety technologies*. 2019. № 4 (86). DOI: <http://doi.org/10.25257/TTS.2019.4.86.53-61>.

3. Mokshantsev A. V., Beresnev D. S. Integrated approach in planning of search and rescue operations // *Proceedings of the V Intern. Conf. of young scientists and specialists “Problems of technosphere safety — 2016”*. М. : Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2016. 382 p.

4. *Guidelines for International Aviation and Maritime Search and Rescue*. IMO, ICAO. Any edition, volume 1, 2, 3. *International Guide to Aviation and Maritime Search and Rescue*. IMO, ICAO. Any edition, volume 1, 2, 3.

5. Mokshantsev, A. V., Topolsky, N. G., Do, Thanh Hoang. Model of the information system to support management decision-making during search operations in fire conditions // *Historical experience, current problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire*

safety : collection of abstracts of reports of the international scientific and practical conference. M. : Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2018. pp. 543–547. DOI: <http://doi.org/10.25257/TTS.2019.4.86.53-61>.

6. Napolskikh, M. L. The lifeguard's craft. Search and rescue operations in the natural environment. Arkhangelsk, 2011. 194 p. URL: https://aocc.ru/wp-content/uploads/downloads/2012/11/Napolskih_SAR.pdf (date of application: 29.01.2025).

7. Yudinsev, B. S. Synthesis of the neural network system of trajectory planning for a group of mobile robots // Control, communication and security systems. 2019. № 4. pp. 163–186. DOI: <http://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10406>.

8. Zenkevich, S. L., Nazarova, A. V., Huo Jianwen. Formation Control of Ground Multi-agent System Using Quadcopter with Camera // In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control, Springer. 2020. Vol. 272. pp. 113–124. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_9.

9. Dousai, N. M. K., Lončarić, S. Detecting humans in search and rescue operations based on ensemble learning // IEEE Access. 2022. Vol. 10. pp. 26481–26492. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3156903>.

10. Hakimy Salem, M. S., Kamaru Zaman, F. H., Tahir, N. Md. Human detection implementation on UAVs in search and rescue operation // Journal of Electrical & Electronic Systems Research. 2021. Vol. 18. pp. 70–76. DOI: <http://doi.org/10.24191/jeesr.v18i1.012>.

11. Emergency rescue work in the conditions of destroyed buildings. Features of technology, organisation and management : a monograph / S. P. Chumak ; Ministry of Emergency Situations of Russia. M. : FGU VNII GOCHS (FTS), 2010. 232 p.

12. Poroshin, I. E., Titov, M. A. Use of artificial neural networks for parametric identification of objects // Young Scientist. 2020. № 26 (316). pp. 39–42. URL: <https://moluch.ru/archive/316/72192/> (date of application: 02.03.2025).

13. Simonyan, K., Zisserman, A. Very Deep Convolutional Net-works for Large-Scale Image Recognition // Cornell University : website. URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (date of application: 02.03.2025).

14. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Medical image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, 5–9 October 2015. Berlin : Heidelberg : Springer, 2015. Vol. 9351. pp. 234–241. DOI: <http://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Геннадий Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29); РИНЦ ID: 150450; e-mail: zvetkov71043@mail.ru

Коковин Андрей Николаевич, аспирант Пермского национальный исследовательского политехнического университета (614990, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29); e-mail: kokovin.andriy@yandex.ru

Потураев Пётр Сергеевич, аспирант Пермского государственного национального исследовательского университет (614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15); РИНЦ ID: 1160767; e-mail: poturaevpetr@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gennady A. Tsvetkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Life Safety of Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky Prospekt St., Perm, 614990, Russian Federation); RSCI ID: 150450; e-mail: zvetkov71043@mail.ru

Andrey N. Kokovin, postgraduate student of Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky Prospekt St., Perm, 614990, Russian Federation); e-mail: kokovin.andriy@yandex.ru

Petr S. Poturaev, postgraduate student of Perm State National Research University (15 Bukirev St., Perm, 614068, Russian Federation); RSCI ID: 1160767; e-mail: poturaevpetr@gmail.com

Поступила в редакцию 10.02.2025
Одобрено после рецензирования 21.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 001.891.572

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПЕРЕЧНЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТАХ

Рыбаков Анатолий Валерьевич, Янышев Павел Анатольевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлено исследование воздействия мер государственной политики в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на факторы, приводящие к авариям на объектах нефтяной промышленности.

Описаны ключевые этапы разработки методического подхода к формированию перечня мероприятий, реализуемых в рамках государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 г.: анализ причин аварий (на основе данных из отчетов расследований Ростехнадзора), корреляционный анализ и построение регрессионной модели. Сформулирована оптимизационная задача, связанная с минимизацией ущерба за счет влияния на объемы мероприятий защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Представлены выводы из корреляционного анализа объемов мероприятий, а также построена зависимость ущерба от их объемов.

Полученные результаты позволяют обоснованно формировать планы финансирования мероприятий, направленных на снижение вероятности и последствий аварий, что особенно актуально для объектов добычи нефти, где высок риск техногенных аварий.

Разработанная методика может быть использована органами государственной власти и промышленными предприятиями для повышения эффективности бюджетного планирования и обеспечения максимальной защиты населения и территорий.

Ключевые слова: нефтеперерабатывающие объекты, корреляционный анализ, ущерб от аварий, защита населения и территорий, мероприятия в области защиты от чрезвычайных ситуаций

Для цитирования: Рыбаков А. В., Янышев П. А. Разработка методики по обоснованию перечня мероприятий по снижению ущерба от возможных аварий на нефтеперерабатывающих объектах // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 153–164.

THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING A LIST OF MEASURES TO REDUCE DAMAGE FROM POSSIBLE ACCIDENTS AT OIL REFINERIES

Anatoly V. Rybakov, Pavel A. Yanyshev
Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article presents a study of the impact of state policy measures in the field of protecting the population and territories from emergency situations on the factors leading to accidents at oil industry facilities.

The key stages of developing a methodological approach to forming a list of measures implemented within the framework of state policy in the field of protecting the population and territories from emergency situations for the period up to 2030 are described: analysis of accident causes (based on data from Rostekhnadzor investigation reports), correlation analysis and construction of a regression model. An optimization problem related to minimizing damage due to the impact on the volumes of measures to protect the population and territories from emergency situations is formulated. The results of the correlation analysis of the volumes of measures are presented, and the dependence of damage on their volumes is constructed.

The obtained results allow us to reasonably formulate plans for financing measures aimed at reducing the probability and consequences of accidents, which is especially relevant for oil production facilities where the risk of man-made accidents is high.

The developed methodology can be used by government bodies and industrial enterprises to improve the efficiency of budget planning and ensure maximum protection of the population and territories.

Keywords: oil refineries, correlation analysis, damage from accidents, protection of population and territories, measures in the field of protection from emergency situations

For Citation: Rybakov A. V., Yanyshv P. A. The development of the methodology for substantiating a list of measures to reduce damage from possible accidents at oil refineries // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 153–164.

Введение

Одним из самых важных аспектов благополучия любого государства является обеспечение защиты населения и территорий от ЧС. В нашей стране постоянное совершенствование механизмов повышения эффективности этой деятельности особенно актуально ввиду масштабов территории, сложности влияния различных поражающих факторов на объекты инфраструктуры, расположенные в субъектах РФ. Российская система обеспечения защиты населения и территорий от ЧС сталкивается с новыми вызовами и угрозами, связанными с негативным изменением окружающей среды, а также усложнением технологических процессов. Это влечет за собой увеличение размеров ущерба в результате аварий, вы-

званных ухудшением состояния элементов опасных производственных объектов, например предприятий по добыче и переработке нефти. Подтверждением актуальности указанных проблем является реализация основ государственной политики в области защиты населения и территорий от ЧС [1]. Утвержденный нормативный акт [1] содержит перечень ключевых мероприятий, осуществляемых в рамках различных направлений, и устанавливает основные критерии для оценки результативности деятельности субъектов РФ в этой сфере.

Основная часть

Анализ показал, что практическая реализация упомянутых выше мероприятий несовершенна, т. к. статистика произошедших

ЧС свидетельствует о имеющихся тенденциях к увеличению либо их количества (в зависимости от вида), либо размера ущерба (рис. 1) [2, 3], несмотря на то, что органы

исполнительной власти субъектов РФ выделяют значительные финансовые ресурсы на реализацию предусмотренных мероприятий по защите населения и территорий от ЧС.

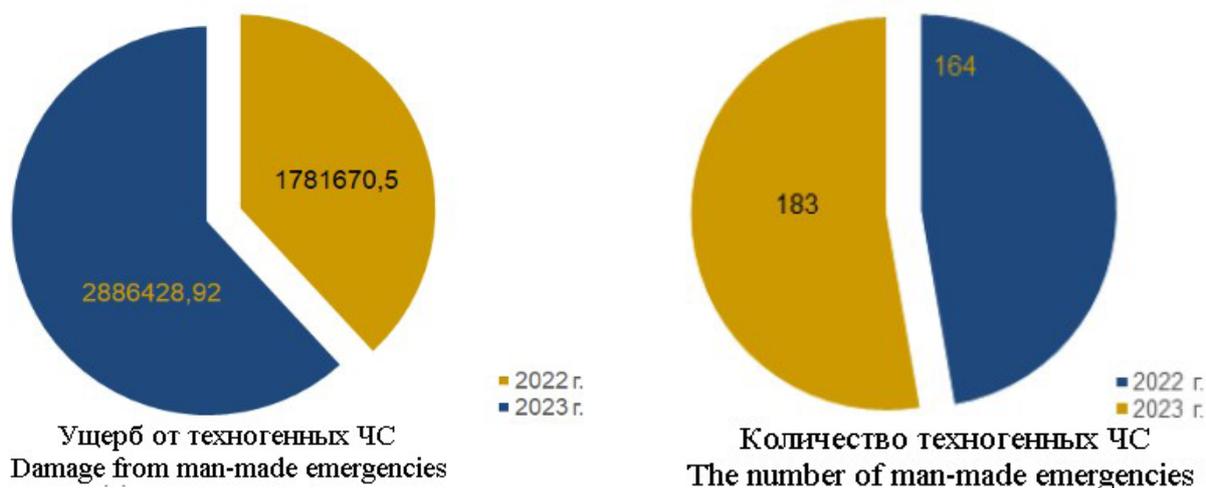


Рис. 1. Статистика ЧС техногенного характера в РФ [2, 3]

Fig. 1. Statistics of man-made emergencies in the Russian Federation [2, 3]

Следует отметить, что в настоящий момент не представляется возможным оценить результативность планирования и дальнейшее освоение финансовых средств, т. е. реальное отсутствие показателей эффективности проводимых мероприятий затрудняет управление государственной политикой в области защиты населения и территорий. В конечном итоге это приводит к непродуктивному распределению бюджетных средств, что, в свою очередь, увеличивает число жертв и размер материального ущерба. Проблема также заключается в отсутствии научно-методического аппарата, позволяющего связать показатели эффективности, под которыми понимается коэффициент значимости проводимых мероприятий, с объемами планируемых мероприятий¹. Здесь необходимо

¹ Под объемом мероприятий в Указе Президента РФ № 12 от 11.01.2018 [1] понимаются финансовые средства для их реализации.

отметить, что одним из важнейших критериев эффективности государственной политики в сфере защиты населения и территорий от ЧС является показатель уровня ущерба. Разрабатываемый научно-методический аппарат для обоснования объема мероприятий должен обеспечивать принятие решений, ориентированных на снижение этого показателя. Предлагаемую методику обоснования перечня мероприятий, непосредственно влияющих на снижение ущерба от возможных аварий на опасных производственных объектах, рассмотрим на примере объектов нефтяной промышленности. В табл. 1 представлены данные по ущербу от аварий на нефтеперерабатывающих объектах, а также средства, предусмотренные для реализации мероприятий в рамках государственной политики по защите населения и территорий от ЧС на период до 2030 г.

Таблица 1

Статистические данные по авариям на объектах добычи и переработки нефти, а также средств, затраченных на мероприятия по предотвращению аварий [2, 3]

Table 1

Statistical data on accidents at oil production and refining facilities, as well as funds spent on accident prevention measures [2, 3]

Год / year	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Количество аварий number of accidents	23	27	23	26	14	26	17	15	14	9
Ущерб от аварий, млн руб. damage from accidents, million rubles	1 201	238	357	289	450	1 740	5 319	3 582	2 277	455
Средства, выделяе- мые на мероприя- тия, тыс., руб. funds allocated for events, thousand rubles	6 349	7 547	6 573	9 494	13 571	10 629	11 153	10 482	8 996	10 359

Анализ статистических данных по объектам добычи и переработки нефти позволил выявить и сгруппировать часто встречающиеся причины аварий, перерастающих в ЧС.

1. Неисправность электрооборудования.
2. Нарушение алгоритма действий, требований безопасности сотрудниками.
3. Стороннее механическое воздействие.
4. Нарушение проектных решений.
5. Образование коррозии.
6. Разрушение материалов, оборудования.
7. Превышение нагрузки, установленной нормами и проектной документацией.
8. Некачественный монтаж, установка, сборка и ремонт оборудования.
9. Неисправное оборудование, низкое качество материалов.

10. Ошибки в проектных решениях предприятий, установок [4].

Перечисленные причины являются наиболее распространенными. Таким образом, обоснование мероприятий, направленных на смягчение последствий возможных инцидентов или аварий, является важной задачей. В работе [5] проведена систематизация мероприятий, которые органы власти субъектов РФ непосредственно планируют и реализуют в области защиты населения и территорий. Из всего перечня, а в нем примерно 70 мероприятий, были выбраны 13, которые, судя по отчетам [4], выполняются на объектах добычи и переработки нефти [9, 10].

Исходя из сложившейся проблемной ситуации требуется постановка задачи пла-

нирования и осуществления мероприятий по защите населения и территорий и подход к ее решению.

Постановка задачи. Для заданного перечня и объемов мероприятий по защите населения и территорий, определя-

емых доступными финансовыми ресурсами и учитывающих выявленные причины аварий, требуется определить такие объемы мероприятий, которые обеспечат эффективное снижение ущерба от возможных ЧС:

$$U = f(P_1, P_2, \dots, P_{10}, V_1, V_2, \dots, V_{13}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где U — индикатор ущерба, нанесенного ЧС техногенного характера, в руб;

P_1, P_2, \dots, P_{10} — причины аварий, принятых на основе статистических данных [4];

V_1, V_2, \dots, V_{13} — объемы мероприятий, осуществляемых в рамках государственной политики по защите населения и территорий от ЧС на объектах нефтедобычи и переработки, с учетом установленных

ограничений на доступные финансовые ресурсы, руб.

Решение задачи. Задача носит оптимизационный характер, где целевой функцией служит показатель ущерба, причиненного ЧС техногенного характера. Поэтому на первом этапе необходимо построить зависимость показателя ущерба от объемов проводимых мероприятий по защите населения и территорий, т. е. решить задачу:

$$U = f(V_1, V_2, \dots, V_{13}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Для этого требуется составить таблицы, содержащие статистические значения по соответствующим показателям.

В соответствии с информацией, приведенной в государственных докладах МЧС России [2, 3] и отчетах Ростехнадзора [4], были сформированы таблицы, содержащие данные о затратах на мероприятия, осуществляемые в рамках государственной политики по защите населения и территорий от ЧС на объектах нефтедобычи и переработки.

Кроме того, собраны сведения о величине ущерба и объемах финансовых ресурсов. Фрагмент данных приведен в табл. 2 [4].

Значения, приведенные в табл. 2, были проанализированы и сформированы для аварий, которые произошли по причине нарушения сотрудниками алгоритма действий, требований безопасности. Важным аспектом является выбор мероприятий, которые непосредственно влияют на снижение последствий аварий, вызванных конкретной причиной.

Таблица 2
Статистические данные затрат на мероприятия по предотвращению аварий и о величине ущерба от ЧС на объектах добычи и переработки нефти, обусловленных причиной P_2 — «Нарушение алгоритма действий, требований безопасности сотрудниками»

Table 2
 Statistical data on the costs of accident prevention measures and the amount of damage from emergencies at oil production and refining facilities caused by reason P_2 — “Violation of the algorithm of actions, safety requirements by employees”

Годы Years	Объемы средств, выделяемых на мероприятия, тыс. руб. The amount of funds allocated to the events, thousand rubles													Ущерб, млн руб. Damage, million rubles
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	
2015	57,6	57,6	0	57,6	57,6	0	0	2 589	897	0	17,9	0	0	81,367
2016	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	0	0	2 131	1017	0	36,3	3,86	0	13,743
2017	162	0	0	0	162	0	0	3 321	841	0	0	0	0	2,923
2018	326	326	326	326	326	0	0	4 778	900	0	7,19	0	0	419,294
2019	307	307	307	307	307	0	3878	3 878	430	430	15,5	0	0	381,239
2020	396	0	396	396	396	488	4068	4 068	268	0	0	4,37	4,37	84,202
2021	285	285	285	285	285	0	0	3 946	442	442	10,3	3,60	3,6	831,562
2022	0	0	0	0	202	0	0	3 496	804	0	0	3,2	3,2	667,398
2023	0	0	0	0	351	0	3682	3 682	754	0	0	3,65	0	112,836

Также необходимо оценить влияние мероприятий друг на друга. Для этого требуется проведение корреляционного анализа, который предполагает вычисление корреляционной матрицы между всеми параметрами (мероприятиями), по которым имеются статистиче-

ские данные [7, 8]. Это позволит определить степень взаимосвязи между ними (табл. 3). Элементы матрицы представляют собой значения парных корреляций между рассматриваемыми объемами мероприятий, которые вычисляются по следующей формуле (3):

$$r_{V_j V_k} = \frac{\sum_{i=1}^9 ((V_{ji} - M_{V_j})(V_{ki} - M_{V_k}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^9 (V_{ji} - M_{V_j})^2 \sum_{i=1}^9 (V_{ki} - M_{V_k})^2}}, \tag{3}$$

где V_{ji} — значения, принимаемые параметром V_j (объем j -го мероприятия);

V_{ki} — значения, принимаемые параметром V_k (объем k -го мероприятия, $j \neq k$);

M_{V_j} — математическое ожидание параметра V_j ;

M_{V_k} — математическое ожидание параметра V_k , $i = \overline{1,9}$.

Проведенный корреляционный анализ позволил выявить высокую зависимость между некоторыми параметрами. В табл. 3 значения коэффициентов корреляции вы-

делены жирным курсивом. Так, например, мероприятие 1 (V_1 — объем финансовых ресурсов, выделяемых в рамках реализации мероприятия, которое заключается в развитии систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и явлений производственной, транспортной и социальной инфраструктуры, биолого-социальных и военных угроз в интересах раннего предупреждения об опасностях [1]) оказывает значительное влияние на следующие аспекты.

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}
V_1	1,00												
V_2	0,61	1,00											
V_3	0,95	0,66	1,00										
V_4	0,95	0,67	0,99	1,00									
V_5	0,64	0,35	0,70	0,66	1,00								
V_6	0,53	-0,27	0,53	0,54	0,45	1,00							
V_7	0,33	-0,03	0,40	0,39	0,66	0,54	1,00						
V_8	0,72	0,59	0,74	0,71	0,90	0,25	0,32	1,00					
V_9	-0,71	-0,27	-0,74	-0,73	-0,71	-0,63	-0,66	-0,51	1,00				
V_{10}	0,44	0,71	0,48	0,48	0,27	-0,19	0,18	0,26	-0,59	1,00			
V_{11}	-0,23	0,12	-0,15	-0,12	-0,68	-0,30	-0,28	-0,65	0,36	0,15	1,00		
V_{12}	-0,16	-0,41	0,01	-0,03	0,17	0,43	0,23	-0,11	-0,28	-0,07	-0,02	1,00	
V_{13}	0,35	-0,08	0,42	0,41	0,40	0,62	0,11	0,30	-0,65	0,18	-0,39	0,64	1,00

Рис. 2. Корреляционная матрица между рассматриваемыми параметрами

Fig. 2. Correlation matrix between the considered parameters

1. Объем финансовых ресурсов, выделяемых в рамках реализации меро-

приятия и направленных на внедрение и развитие иных перспективных автома-

тизированных информационных систем в области мониторинга и прогнозирования ЧС — V_3 .

2. Объем финансовых средств, выделяемых на реализацию мероприятий по совершенствованию регионального государственного надзора в области защиты населения и территорий от ЧС — V_4 [1].

Мероприятие 3 и 4 имеют сильную корреляцию со значением 0,99.

Также мероприятие 5 (V_5 — объем финансовых ресурсов, выделяемых в рамках реализации мероприятия, направленного на выработку и внедрение системы про-

филактики ЧС [1]) связано с мероприятием 8 (V_8 — объем финансовых ресурсов, выделяемых в рамках реализации мероприятия по повышению надежности и оперативности управления производством) [1].

Далее строим регрессионную модель и, используя метод наименьших квадратов, определяем форму математической зависимости. Аналитическое выражение показателя ущерба, связанного с реализацией мероприятий государственной политики по защите населения от ЧС на объектах нефтедобычи и переработки, представлено следующим образом:

$$U = -29,5 \cdot 10^7 - 3803,6 \cdot V_1 - 2864,9 \cdot V_5 - 85,2 \cdot V_7 + 699,7 \cdot V_8 - 1124,5 \cdot V_9 + 768,6 \cdot V_{10} + 0,017 \cdot V_1 \cdot V_3 - 0,013 \cdot V_1 \cdot V_4. \quad (4)$$

Для практического применения (интерпретации) полученной зависимости (4) необходимо учитывать следующие ограничения.

1. $U \geq 0$.
2. Для V_1 и V_8 :

$$3803,6 \cdot V_1 \leq 699,7 \cdot V_8 \Rightarrow V_1 \leq \frac{699,7}{3803,6} \cdot V_8 = 0,184 \cdot V_8.$$

То есть V_1 должно быть в 5,4 раза меньше V_8 .

3. Для V_5 и V_8 :

$$2864,9 \cdot V_5 \leq 699,7 \cdot V_8 \Rightarrow V_5 \leq \frac{699,7}{2864,9} \cdot V_8 = 0,244 \cdot V_8.$$

То есть V_5 должно быть примерно в 4,1 раза меньше V_8 .

4. Для V_7 и V_{10} :

$$85,2 \cdot V_7 \geq 768,6 \cdot V_{10} \Rightarrow V_7 \geq \frac{768,6}{85,2} \cdot V_{10} = 9,02 \cdot V_{10}.$$

Здесь V_7 может быть почти в 9 раз больше V_{10} , поскольку коэффициент у V_7 значительно меньше, чем у V_{10} .

5. Для V_9 и V_{10} :

$$1124,5 \cdot V_9 \leq 768,6 \cdot V_{10} \Rightarrow V_9 \leq \frac{768,6}{1124,5} \cdot V_{10} = 0,684 \cdot V_{10}.$$

То есть V_9 должно быть примерно в 1,5 раза меньше V_{10} .

Поскольку показатель ущерба представлен нелинейным уравнением, наименьшие значения неизвестных $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}$ можно вычислить, используя численные методы для оптимизации, такие как метод Лагранжа [11]. Минимальные положительные значения для переменных: $V_1 = 0,00000000135$; $V_2 = 1$; $V_3 = 1$; $V_4 = 1$; $V_5 = 0,00000000135$; $V_6 = 0,00000000135$; $V_7 = 0,00000000135$; $V_8 = 124016$; $V_9 = 0,00000000135$; $V_{10} = 270916$.

Результаты и их обсуждения

Безусловно, при дефиците значений выделяемых финансовых средств такой подход является несколько неточным. Однако полученный результат позволяет с практической точки зрения не только обосновать перечень мероприятий, который непосредственно будет влиять на устранение конкретной причины по критерию снижения ущерба, но и, главное, установить зависимость ущерба от объемов реализуемых мероприятий. На основе полученной зависимости (3) было выявлено, что наиболее значимое влияние на снижение ущерба оказывают мероприятия, связанные:

- с повышением надежности и оперативности управления производством (V_8);

- развитием систем мониторинга и прогнозирования (V_{10}).

Выводы

Была разработана методика обоснования перечня мероприятий, направленных на снижение ущерба от возможных аварий на опасных производственных объектах нефтяной промышленности. Основное внимание уделялось оценке влияния объемов финансирования.

Были выделены следующие основные этапы.

- 1. Анализ причин аварий.** Выявлены основные причины ЧС, включая неисправности оборудования, нарушения безопасности и ошибки в проектных решениях.
- 2. Корреляционный анализ.** Была обнаружена взаимосвязь между объемами финансирования мероприятий и их результативностью в предотвращении аварий;
- 3. Разработка регрессионной модели.** С помощью нее описывается математическая зависимость ущерба от объемов реализуемых мероприятий, что позволяет количественно оценить вклад каждого из них в снижение итогового уровня ущерба.

В результате исследования была установлена математическая зависимость ущерба U от объемов мероприятий, что позволяет определять оптимальное распределение средств.

Полученные в формуле (4) коэффициенты регрессии свидетельствуют о том, что минимизация ущерба достигается финансированием мероприятий V_8, V_{10} .

Разработанный подход базируется на анализе государственных мер по защите на-

селения и территорий от ЧС и направлен на оптимизацию использования финансовых ресурсов с целью повышения результативности мер по предотвращению аварий.

Полученные результаты исследований могут быть эффективно использованы при разработке планов распределения финансовых ресурсов, предусмотренных государственной политикой в области защиты населения и территорий от ЧС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основы государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года : указ Президента РФ № 12 от 11 января 2018 г. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556190585> (дата обращения: 18.09.2024).

2. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году : государственный доклад МЧС России // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343> (дата обращения: 15.08.2024).

3. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году : государственный доклад МЧС России // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (дата обращения: 15.08.2024).

4. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, надзор за объектами нефтегазового комплекса : офиц. сайт. URL: <https://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 20.09.2024).

5. Нестеров В. А. Обоснование рационального плана мероприятий по реализации государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на территории субъекта Российской Федерации : дис. ... канд. техн. наук. Химки : Академия гражданской защиты МЧС России, 2020. 168 с.

6. Шаныгин С. И. Корреляционный и регрессионный анализ : учебник для вузов. М. : Юрайт, 2024. 70 с.

7. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа / под ред. И. Н. Коваленко. М. : Мир, 1983. 312 с.

8. Верескун А. В, Жданенко И. В. Повышение уровня защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: механизмы стратегического планирования // Технологии гражданской безопасности. 2018. № 3 (57). С. 20–25.

9. Кавьяр А. Ю. Административно-правовой механизм обеспечения прав граждан Российской Федерации в сфере защиты населения от чрезвычайных ситуаций : магистерская дис. Тольятти : ТГУ, 2023. 70 с.

10. Нестеров В. А., Ерохин Р. А., Иванов Е. В. О реализации информационной системы оценки состояния защиты субъекта (арктической зоны) Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций // Моделирование сложных процессов и систем : сб. тр. секции № 12 XXX Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь». Химки, 2020. С. 11–17.

11. Гребенникова И. В. Методы оптимизации : учебное пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 148 с.

REFERENCES

1. Fundamentals of state policy in the field of protection of population and territories from emergency situations for the period up to 2030 : Decree of the President of the Russian Federation № 12 of January 11, 2018 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556190585> (date of application: 18.09.2024).

2. On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2023 : state report of the Ministry of Emergency Situations of Russia // Ministry of Emergency Situations of Russia : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343> (date of application: 15.08.2024).

3. On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2022 : state report of the EMERCOM of Russia // EMERCOM of Russia : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (date of application: 15.08.2024).

4. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, supervision over oil and gas facilities : official website. URL: <https://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (date of application: 20.09.2024).

5. Nesterov V. A. Justification of the rational plan of measures for realization of the state policy in the field of protection of the population and territories from emergency situations on the territory of the subject of the Russian Federation : a dissertation candidate of technical sciences. Khimki : Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. 168 p.

6. Shanygin S. I. Correlation and regression analysis : a textbook for universities. M. : Yurait, 2024. 70 p.

7. Bendat J., Piersol A. Application of correlation and spectral analysis / ed. by I. N. Kovalenko. N. Kovalenko. M. : Mir, 1983. 312 p.

8. Vereskun A. V., Zhdanenko I. V. Increasing the level of protection of population and territories from emergencies: mechanisms of strategic planning // Civil Security Technologies. 2018. № 3 (57). pp. 20–25.

9. Kavyar A. Yu. Administrative-legal mechanism of ensuring the rights of citizens of the Russian Federation in the sphere of protection of the population from emergency situations : master's thesis. Togliatti : TSU, 2023. 70 p.

10. Nesterov V. A., Erohin R. A., Ivanov E. V. About realization of the information system of estimation of the state of protection of the subject (Arctic zone) of the Russian Federation from emergency situations // Modeling of complex processes and systems : proceedings of section № 12 of XXX International scientific-practical conference "Prevention. Rescue. Help". Khimki, 2020. pp. 11–17.

11. Grebennikova I. V. Optimization methods : textbook. Ekaterinburg : UrFU, 2017. 148 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыбаков Анатолий Валерьевич, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры информационных систем и технологий Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Химки, мкр. Новогорск); SPIN-код автора: 8654-3788; e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

Янышев Павел Анатольевич, адъюнкт научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Химки, мкр. Новогорск); SPIN-код автора: 4278-6286; e-mail: yanishevp@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly V. Rybakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia (building 1A, Sokolovskaya St., Novogorsk mkr., Khimki, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8654-3788; e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

Pavel A. Yanyshhev, Adjunct of the Research Center of the Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia (building 1A, Sokolovskaya St., Novogorsk mkr., Khimki, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 4278-6286; e-mail: yanishevp@gmail.com

Поступила в редакцию 28.12.2024

Одобрено после рецензирования 19.02.2025

Принята к публикации 14.03.2025

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК: 65:614.842:005.591.1

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Черепанов Евгений Александрович

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность исследования заключается в том, что оптимальное размещение гидрантов является одним из основных факторов повышения эффективности тушения крупных пожаров, возникших в результате чрезвычайной ситуации. В настоящей статье представлена реализация рационального размещения системы противопожарного водоснабжения, которая предполагает масштабирование исходных данных в точки единичного куба. Предложено графически компактное расположение гидрантов, позволяющее при трассировке сократить количество распределительных линий и другого оборудования, а также ускорить принятие управленческих решений по рациональному размещению системы гидрантов на заданной местности. Результаты применения разработанного алгоритма могут быть использованы при построении моделей установки пожарных гидрантов, которые играют важную роль в оптимизации процесса реагирования на пожар, тем самым способствуя повышению шансов на выживание граждан во время чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, противопожарное водоснабжение, пожаротушение, пожарная безопасность, пожарный гидрант

Для цитирования: Черепанов Е. А. Информационная поддержка рационального размещения системы противопожарного водоснабжения // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 165–173.

INFORMATION SUPPORT FOR THE RATIONAL PLACEMENT OF A FIRE-FIGHTING WATER SUPPLY SYSTEM

Evgeny A. Cherepanov

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

Abstract. The relevance of the study lies in the fact that the optimal placement of hydrants is one of the main factors in increasing the effectiveness of extinguishing large fires that arise as a result of an emergency. This article presents the implementation of the rational placement of a fire-fighting water supply system, which involves scaling the initial data to the points of a single cube. A graphically compact arrangement of hydrants is proposed, which makes it possible to reduce the number of distribution lines and other equipment during tracing, as well as speed up management decisions on the rational placement of the hydrant system in a given area. The results of applying the developed algorithm can be used in constructing models for installing fire hydrants, which

play an important role in optimizing the fire response process, thereby contributing to increasing the chances of citizen survival during an emergency.

Keywords: emergency, fire-fighting water supply, fire extinguishing, fire safety, fire hydrant

For Citation: Cherepanov E. A. Information support for the rational placement of a fire-fighting water supply system // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 165–173.

Введение

Крупные ЧС в мире происходят ежегодно и достаточно часто сопровождаются многомиллионным материальным, экологическим ущербом и, к сожалению, не обходятся без человеческих жертв. Так, по статистическим данным, ущерб от одной ЧС в 2023 г. оценивался в ~210,9 млн руб. Количество погибших в 2023 г. составило 310 человек, из них 288 человек погибли при техногенных ЧС и 29 человек — при природных ЧС [1].

Важно также учитывать, что в большинстве ЧС происходит возникновение масштабных пожаров, создающих аварийную обстановку. В настоящее время в подобных ситуациях ликвидация горения веществ и материалов осуществляется посредством охлаждения огнетушащими веществами или перемешивания горючего [2], однако наиболее доступным огнетушащим средством до сих пор является вода. Так, наличие источников наружного противопожарного водоснабжения (водных объектов) и исправное состояние гидрантов становятся важными условиями обеспечения пожарной безопасности, влияющими на эффективность тушения пожаров, проведения аварийно-спасательных работ, спасения человеческих жизней и материальных ценностей [3]. Таким образом, вопрос оптимального размещения гидран-

тов, установленных на водопроводной сети, является актуальным.

Результаты и их обсуждение

Согласно установленным нормам и правилам в строительстве, здания должны располагаться на расстоянии 20–25 м друг от друга. При этом их размеры в несколько раз могут превышать обозначенные параметры и быть соизмеримыми с требованием располагать гидранты на расстоянии, не превышающем $R = 200$ м. Следует также отметить, что пожарные проезды между зданиями должны иметь размер, равный 9 м [3–7]. Следовательно, при разработке модели размещения элементов системы противопожарного водоснабжения необходимо учитывать размеры зданий, равномерно распределяя гидранты.

В предложенном алгоритме поиска рационального размещения системы противопожарного водоснабжения здание сложной конструкции (рис. 1) можно рассматривать как несколько зданий стоящих рядом.

Графически компактное расположение гидрантов позволит при трассировке экономить количество распределительных линий, пожарных рукавов и другого оборудования.

Если известны координаты углов проектируемых зданий, их этажность, статус

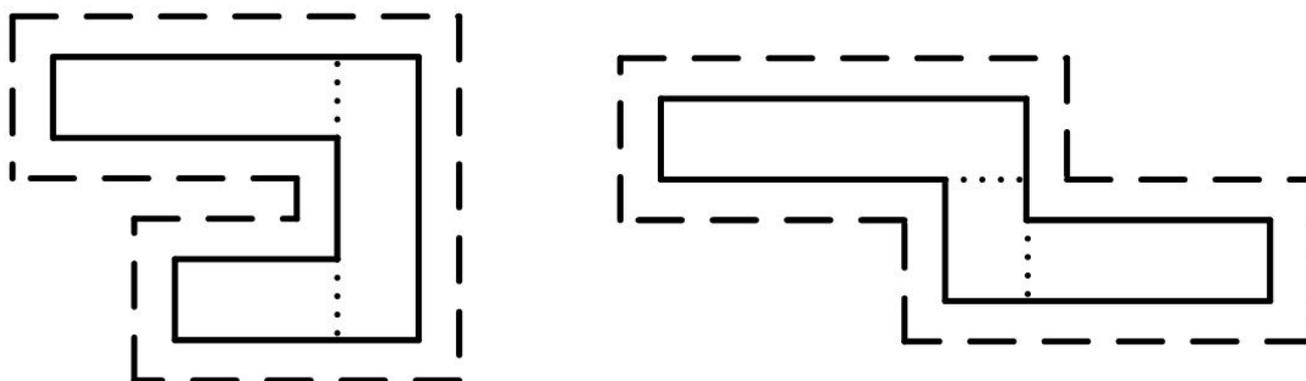


Рис. 1. Графическая интерпретация зданий сложной конструкции
 Fig. 1. Graphical interpretation of buildings of complex construction

принадлежности, то процесс размещения гидрантов, а также их численность можно автоматизировать [8].

Для поиска рационального размещения системы противопожарного водоснабжения на вход реализованной программы

подавали набор точек в двумерном пространстве, расположение которых относительно друг друга позволяет идентифицировать при помощи 2D-визуализации наиболее подходящие места для установки гидрантов (рис. 2).

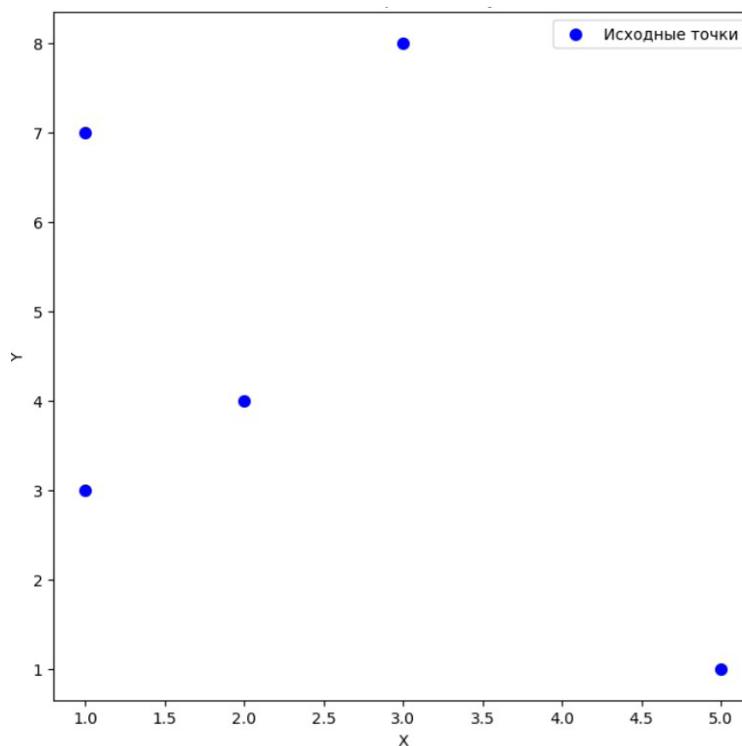


Рис. 2. Пример расположения исходных точек в пространстве относительно друг друга
 Fig. 2. An example of the location of the starting points in space relative to each other

Исходные данные преобразовывали для размещения в пространстве единичного куба, визуально делимого на восемь

маленьких квадратиков, центры которых вычисляются по одной из двух метрик расстояний:

$$\rho(M_k, M_i) = |x_k - x_i| + |y_k - y_i| + |z_k - z_i|, \tag{1}$$

$$\rho(M_k, M_i) = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}. \tag{2}$$

Вычисляем минимальное значение метрики расстояния и тем самым определяем центр квадратика, в котором оно достигается (рис. 3).

В случае установленного порога приближения в две точки ответ достигнут, и тогда оптимальными точками из исходного набора значений будут 1,7 и 3,8.

На рис. 4 и 5 представлен расчет в программе, сопровождаемый консольным выводом численных значений на экран.

Если точность задана в одну точку, тогда выявленный квадратик с центром, где целевая функция достигает минимума, и точ-

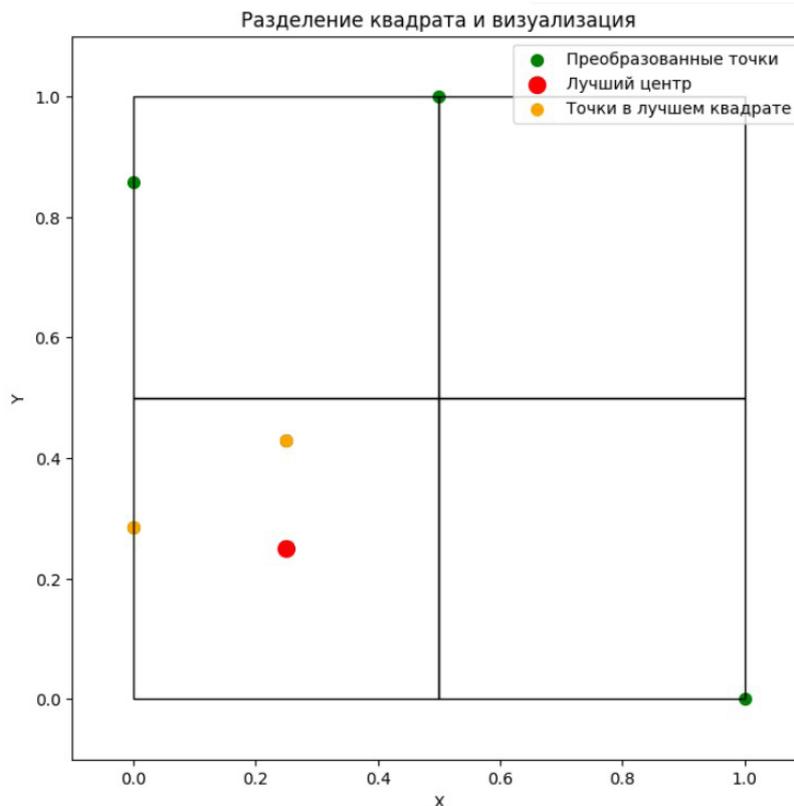


Рис. 3. Деление пространства единичного квадрата на четыре квадратика и определение центра одного из них с минимальным значением целевой функции

Fig. 3. Dividing the space of a unit square into four squares and determining the center of one of them with the minimum value of the objective function

```
Исходные точки: [(1, 3), (2, 4), (1, 7), (5, 1), (3, 8)]
Преобразованные точки: [(0.0, 0.286), (0.25, 0.429), (0.0, 0.857), (1.0, 0.0), (0.5, 1.0)]
Минимальное значение F1: 3.322
Центр с минимальным значением F1: (0.25, 0.25)
Оставшиеся точки в квадрате с минимальным F1: [(0.0, 0.286), (0.25, 0.429)]
```

Рис. 4. Консольный вывод результатов работы при вычислении первой метрики
 Fig. 4. Console output of the work results when calculating the first metric

```
Минимальное значение F2: 2.534
Центр с минимальным значением F2: (0.25, 0.75)
Оставшиеся точки в квадрате с минимальным F2: [(0.0, 0.857), (0.5, 1.0)]
```

Рис. 5. Консольный вывод результатов работы при вычислении второй метрики
 Fig. 5. Console output of the work results when calculating the second metric

ки, попавшие в него (рис. 6), подаются на вход следующей итерации для преобразования к единичному квадрату и вычисления в нем нового квадрата с минимальным значением целевой функции в центре (рис. 7).

Полученные результаты сопровождаются консольным выводом на экран (рис. 8).

Таким образом, в случае заданной точности в одну точку в качестве оптимального решения получили точку с исходными координатами, равными 1,7.

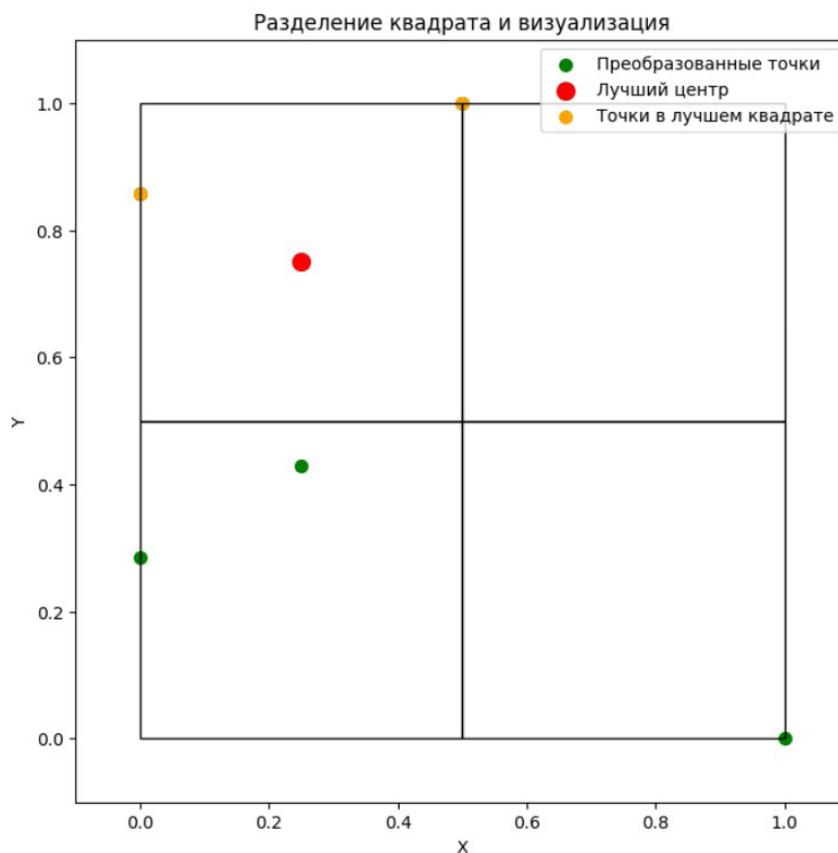


Рис. 6. Визуализация исходных точек для второй итерации алгоритма
 Fig. 6. Visualization of the starting points for the second iteration of the algorithm

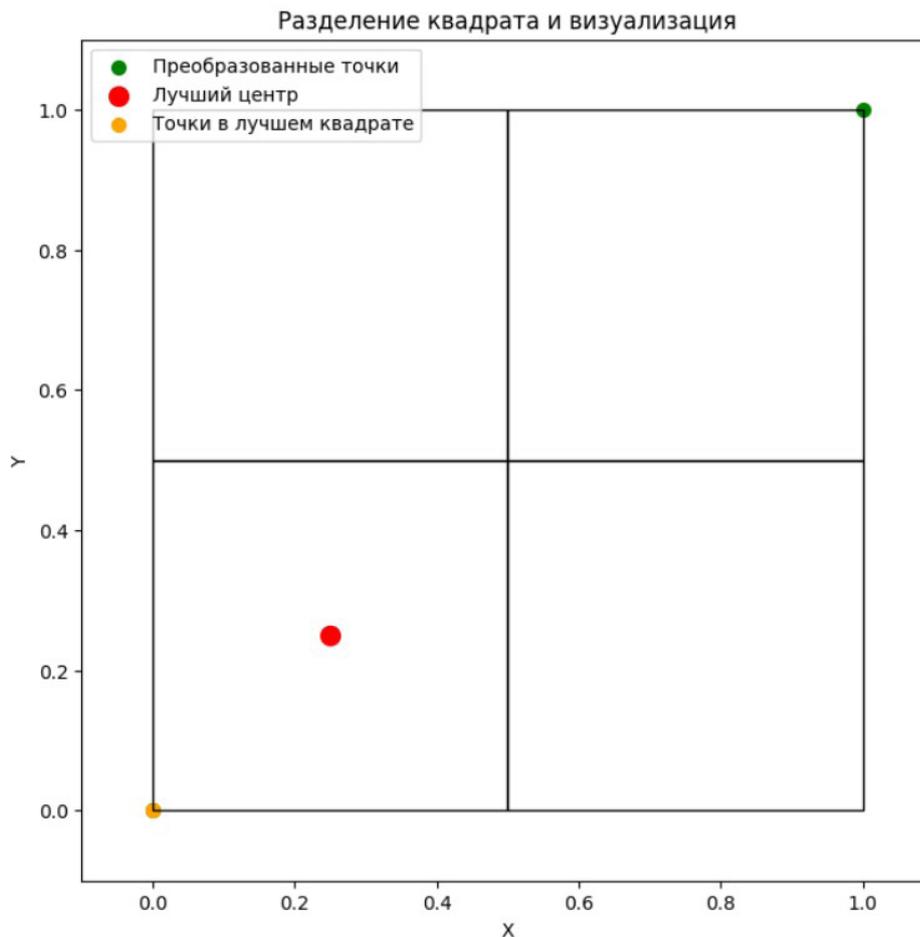


Рис. 7. Приведение левого верхнего квадратика и точек в нем к единичному квадрату и результат определения центра нового квадратика с минимальным значением целевой функции

Fig. 7. Reducing the upper left square and the points in it to a unit square and the result of determining the center of the new square with the minimum value of the objective function

Для наглядного представления работоспособности можно использовать необходимый участок местности, изображенный на карте, в качестве фона графика (рис. 9).

Для удобства отмеченные точки были пронумерованы, чтобы в результате обратных вычислений возможно было получить требуемую точку в явном виде.

```
Исходные точки: [(0.0, 0.857), (0.5, 1.0)]
Преобразованные точки: [(0.0, 0.0), (1.0, 1.0)]
Минимальное значение F1: 2.0
Центр с минимальным значением F1: (0.25, 0.25)
Оставшиеся точки в квадрате с минимальным F1: [(0.0, 0.0)]
```

Рис. 8. Консольный вывод результатов работы второй итерации алгоритма

Fig. 8. Console output of the results of the second iteration of the algorithm

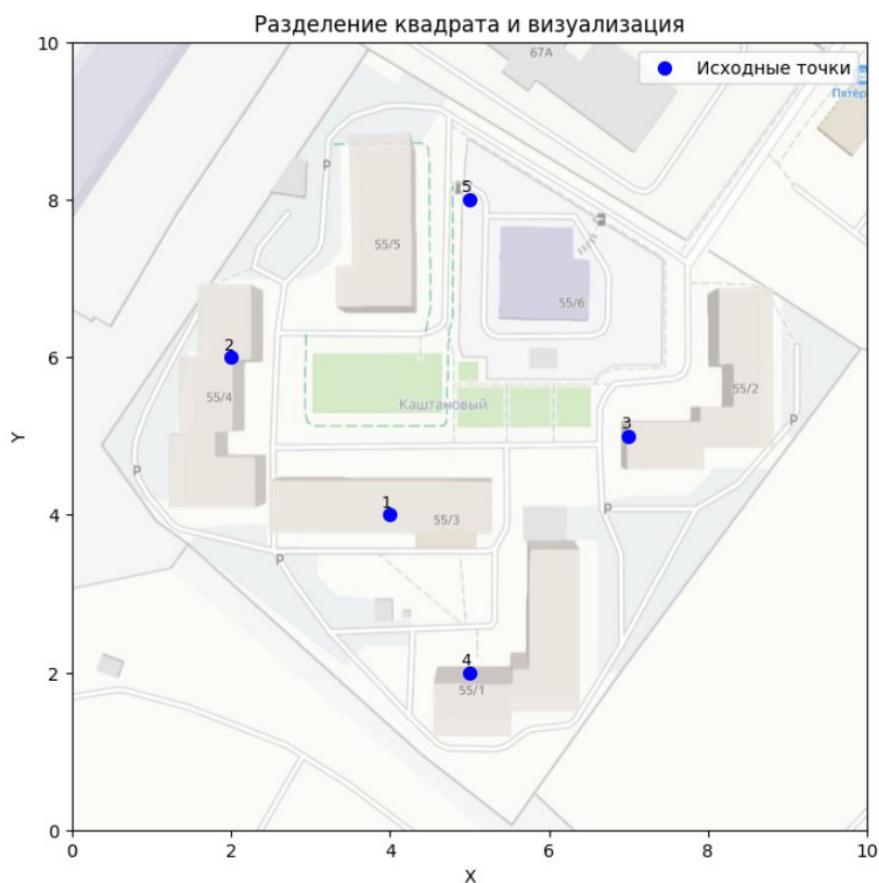


Рис. 9. Пример расположения исходных точек в пространстве на карте относительно друг друга

Fig. 9. An example of the location of the starting points in space relative to each other on the map

Выводы

Представленный алгоритм поиска рационального размещения системы противопожарного водоснабжения был апробирован на системе противопожарного водоснабжения АО «Уральский электромеханический завод» (г. Екатеринбург). Результаты его при-

менения могут быть использованы при построении моделей размещения элементов системы противопожарного водоснабжения, разработке типовых паспортов безопасности территорий, паспортов безопасности потенциально опасных объектов и совершенствовании плана действий организаций и учреждений по предупреждению и ликвидации ЧС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чрезвычайные ситуации и их последствия в Российской Федерации за 2022–2023 гг. : статистический сборник / под общ. ред. А. Г. Фирсова, А. А. Порошина. М. : ВНИИПО, 2025. 100 с.
2. Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : приказ МЧС

России от 16.09.2024 № 777 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310127352> (дата обращения: 01.03.2025).

3. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ : принят Государственной думой 12 апреля 2006 г. : одобрен Советом Федерации 26 мая 2006 г. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901982862> (дата обращения: 01.03.2025).

4. Гидравлика и противопожарное водоснабжение / Ю. Г. Абросимов [и др.]. М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. 422 с.

5. Гуров А. В., Гриднев Е. Ю. К вопросу о создании противопожарного водоснабжения // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2012. № 1. С. 49–51.

6. ГОСТ Р 12.4.026–2015. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний : межгос. стандарт : приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 июня 2016 г. № 614-ст межгос. стандарт ГОСТ 12.4.026–2015 введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации с 1 марта 2017 г. : введен впервые : дата введения 2017-03-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136061?marker=7D20K3> (дата обращения: 01.03.2025).

7. Гидравлика и пожарное водоснабжение / Е. Д. Мальцев [и др.] ; под ред. Е. Д. Мальцева ; Высш. инж. пожарно-техн. школа МВД СССР. М. : [б. и.], 1976. 448 с.

8. Калач А. В., Черепанов Е. А., Акулов А. Ю. Модель установки пожарных гидрантов с учетом особенности размеров и расположения зданий // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 27 сентября 2019 г. / сост. А. В. Зыков, Н. В. Федорова. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. С. 21–23.

REFERENCES

1. Emergencies and their consequences in the Russian Federation for 2022–2023 : statistical compendium / ed. by A. G. Firsov, A. A. Poroshin. M. : VNIPO, 2025. 100 p.

2. On the approval of the Combat Statute of firefighting units, determining the order of organization of fire extinguishing and rescue work : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 16.09.2024 № 777 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310127352> (date of application: 01.03.2025).

3. Water Code Russian Federation from 03.06.2006 № 74-FZ : adopted by the State Duma on April 12, 2006 : approved by the Federation Council on May 26, 2006 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901982862> (date of application: 01.03.2025).

4. Hydraulics and fire-fighting water supply / Yu. G. Abrosimov et al. M. : Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2003. 422 p.

5. Gurov A. V., Gridnev E. Yu. To the issue of creating firefighting water supply // Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2012. № 1. pp. 49–51.

6. GOST R 12.4.026–2015. Signal colors, safety signs and signal markings. Purpose and rules of application. General technical requirements and characteristics. Test methods : interstate standard : by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from June 10, 2016 № 614-st interstate standard GOST 12.4.026–2015 is put into effect as a national standard of the Russian Federation from March 1, 2017. : introduced for the first time : date of introduction 2017-03-01 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136061?marker=7D20K3> (date of application: 01.03.2025).

7. Hydraulics and fire water supply / E. D. Maltsev et al. ; ed. by E. D. Maltsev ; Higher engineering fire-technical school of the USSR Ministry of Internal Affairs. M. : [b. i.], 1976. 448 p.

8. Kalach A. V., Cherepanov E. A., Akulov A. Yu. Model of fire hydrant installation taking into account the size and location of buildings // Security Service in Russia: experience, problems, prospects. Modern methods and technologies of prevention and prophylaxis of emergencies : proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference, St. Petersburg, September 27, 2019 / comp. A. V. Zыkov, N. V. Fedorova. SPb. : St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. pp. 21–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Черепанов Евгений Александрович, старший преподаватель кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. Cherepanov, Senior Lecturer, the Department of Supervisory Activity and Law, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); RSCI ID: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2025
Одобрено после рецензирования 15.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025