

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Цыганков М. С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ИНДУКТОРА ПЕРЕНОСНОГО УСТРОЙСТВА ПРОГРЕВА ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ4

Емельянов Н. А.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ВИДЕОПОТОКЕ13

Терентьев Д. И., Кокшаров А. В., Сатюков Р. С.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКСИЧНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОЖАРЕ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМ-ФАКТОРА 1865024

Крудышев В. В., Опарин И. Д., Кузнецов А. А., Дзигоев А. Ф.

О ПРИМЕНЕНИИ ТАКТИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ТОРГОВЫХ ЦЕНТРАХ33

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АМФИФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЖАРОТУШАЩЕГО ВОДЯНОГО ТУМАНА46

Парфененко А. П., Брюхов Е. Н., Ларченко В. А.

ВЛИЯНИЕ УКЛОНА ЛЕСТНИЦ НА ПРОЦЕСС ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ57

Гарелина С. А., Латышенко К. П., Любкин Р. Н.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЛОГИСТИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА70

Любкин Р. Н.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ВЫЕЗДНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП МЧС РОССИИ81

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Ткаченко Ю. А., Тимарин А. Н.

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЫСТРО-ВОЗВОДИМЫХ ЗАЩИТНЫХ ДАМБ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ92

Веселов А. В., Давыдов Р. М., Кузьмин А. В.

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИБОРОВ ПОИСКА99

Полторанов Д. В., Арефьева Е. В., Кузнецова Т. Д.

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВОЛОНТЕРСКОГО И ДОБРОВОЛЬЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ114

Хлопцев А. В., Шубкин Р. Г., Бабенышев С. В.

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ ОТ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РЕГИОНАХ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ135

Скрынников А. Ю.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СУШЕ151

Волынец И. Г., Терехов А. Л., Чубуков Н. Н.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ163

CONTENTS

FIRE SAFETY

Mikhail S. Tsygankov

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE INDUCTOR OF A PORTABLE DEVICE FOR HEATING INTUMESCENT FLAME RETARDANTS.....4

Nikita A. Emelyanov

APPLICATION OF NEUTRAL NETWORK ALGORITHMS AND MACHINE LEARNING FOR AUTOMATIC FIRE DETECTION VIDEO STREAM.....13

Dmitry I. Terentiev, Alexandr V. Koksharov, Roman S. Satukov

FEATURES OF THE FORMATION OF THE TOXIC GAS ENVIRONMENT IN A ROOM DURING A FIRE IN COBALT-CONTAINING LITHIUM-ION BATTERIES COMPOSED OF 18650 FORM FACTOR CELLS24

Vladimir V. Krudyshev, Ivan D. Oparin, Anton A. Kuznetsov, Artur F. Dzagoev

ON THE USE OF TACTICAL VENTILATION IN SHOPPING MALLS33

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

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONCENTRATION OF AMPHIPHILIC COMPOUNDS IN WATER TO INCREASE THE STABILITY OF FIRE-EXTINGUISHING WATER MIST46

Alexander P. Parfenenko, Evgeniy N. Bryukhov, Valery A. Larchenko

THE EFFECT OF THE STAIR SLOPE ON THE EVACUATION PROCESS OF PEOPLE57

Svetlana A. Garelina, Konstantin P. Latyshenko, Roman N. Lyubkin

PLANNING THE LOGISTICS OF PERFORMING VERIFICATION WORK TAKING INTO ACCOUNT A RISK-BASED APPROACH70

Roman N. Lyubkin

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE ROUTES OF THE VISITING METROLOGICAL GROUPS OF THE EMERCOM OF RUSSIA81

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Yulia A. Tkachenko, Aleksey N. Timarin

APPROACHES TO OPTIMIZING TIME INDICATORS IN THE CONSTRUCTION OF FAST-MOVING PROTECTIVE DAMS BY PARALLEL TASK EXECUTION91

Alexey V. Veselov, Roman M. Davydov, Alexander V. Kuzmin

COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF SEARCH DEVICES99

Denis V. Poltoranov, Elena V. Arefieva, Taisiya D. Kuznetsova

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF VOLUNTEER MOVEMENT IN THE FIELD OF PREVENTION AND
ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF EMERGENCY SITUATIONS114

Alexander V. Kholoptsev, Roman G. Shubkin, Sergey V. Babenyshev

DEPENDENCE OF CHANGES IN THE NUMBER OF LANDSCAPE FIRES ON VARIATIONS IN TOTAL
SOLAR RADIATION FLOWS IN THE REGIONS OF THE ASIAN PART OF RUSSIA135

Alexey Yu. Skrynnikov

MATHEMATICAL MODELING OF THE DESIGN OF A MOBILE MEANS OF LOCALIZATION OF OIL
AND PETROLEUM PRODUCTS SPILLS ON LAND151

Igor G. Volynets, Alexey L. Terekhov, Nikolay N. Chubukov

TECHNOSPHERIC SAFETY OF GAS TRANSMISSION NETWORK FACILITIES BASED ON ACOUSTIC
IMAGING TECHNOLOGY163

УДК 614.849

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ИНДУКТОРА ПЕРЕНОСНОГО УСТРОЙСТВА ПРОГРЕВА ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Цыганков Михаил Сергеевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрен недостаток существующих методик проверки качества огнезащитной обработки металлических конструкций, в частности факт отсутствия полевого метода исследования огнезащитных вспучивающихся покрытий для металлических конструкций; представлен разработанный метод исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий, и описаны характеристики используемого генераторного блока индукционного нагрева; проведены расчеты двенадцати вариаций индуктора, и представлен наилучший из них. Определено, что наиболее эффективным является индуктор, состоящий из двух последовательно соединенных катушек, цилиндрической на четыре витка и плоской на два витка. Рассчитана индуктивность оптимального индуктора, и установлено, что полученный результат не противоречит требованиям завода — изготовителя генераторного блока индукционного нагрева. Представлены результаты проведенных эмпирических исследований, которые хорошо коррелируют с теоретическими. Подтверждена эффективность выбранной оптимальной модели опытным путем. Предложены пути оптимизации прототипа устройства.

Ключевые слова: вспучивающиеся огнезащитные покрытия, индуктивность, индуктор, устройство проверки качества, пожарная безопасность

Для цитирования: Цыганков М. С. Определение оптимальной конфигурации индуктора переносного устройства прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 4–12.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE INDUCTOR OF A PORTABLE DEVICE FOR HEATING INTUMESCENT FLAME RETARDANTS

Mikhail S. Tsygankov

University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation
State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The article considers the disadvantage of existing methods for checking the quality of flame-retardant treatment of metal structures, in particular, the fact that there is no field method for studying flame-retardant bulging coatings for metal structures. The developed method of studying bulging flame-retardant coatings is presented and the characteristics of the induction heating generator unit used are described. Calculations of 12 variations of the inductor are carried out and optimal results are presented. It is determined that the most effective is an inductor consisting of two coils connected in series, cylindrical for 4 turns and flat for 2 turns. The inductance of the optimal inductor is calculated and it is established that the result obtained does not contradict the requirements of the manufacturer of the induction heating generator unit. The results of empirical studies that correlate well with theoretical ones are presented. The effectiveness of the chosen optimal model has been confirmed experimentally. The ways to optimize the prototype of a device for quality control of flame-retardant treatment of metal structures are proposed.

Keywords: bulging flame retardant coatings, inductance, inductors, quality control device, fire safety

For Citation: Tsygankov M. S. Determination of the optimal configuration of the inductor of a portable device for heating intumescent flame retardants // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 4–12.

Введение

Вспучивающиеся огнезащитные покрытия, применяемые для повышения огнестойкости металлических конструкций, используются уже несколько десятков лет, они обладают всеми необходимыми характеристиками с точки зрения обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты, а также уникальными эстетическими свойствами.

В научных трудах [1–5] достаточно подробно описаны актуальность проблемы отсутствия доступного полевого метода исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий и обоснована необходимость его разработки. Автором статьи был разработан и запатентован потенциально полезный метод проверки качества огнезащитных покрытий, который может быть исполь-

зован в качестве полевого метода исследования [6]. Положительными сторонами разработанного метода являются отсутствие открытого пламени в ходе проведения исследований огнезащитного покрытия, а также наличие высокой температуры, необходимой для абсолютного вспучивания огнезащитного покрытия на всю глубину. Принцип двустороннего прогрева огнезащитного покрытия, в свою очередь, минимизирует теплоотвод через металлическую конструкцию от прогреваемой части покрытия, что приводит к значительному уменьшению времени проведения исследований.

Предложенный метод исследования огнезащитного покрытия базируется на явлении электромагнитной индукции. Так как при разработке прототипа устройства в качестве генераторного блока индукционного нагрева была использована готовая

конструкция индукционной плавильной мини-печи «Микроша-3000», разработанная и производимая компанией «НАША ЭЛЕКТРОНИКА», предназначенная для плавки цветных металлов и их сплавов в графитовом тигле, то отправной точкой в расчетах при разработке узла индуктора были исходные характеристики «Микроша-3000».

Материалы и методы

На этапе планирования и проектирования автором статьи было проведено исследование характеристик устройства «Микроша-3000» и определена возможность использования его в качестве генераторного блока индукционного нагрева для прототипа устройства двустороннего прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий. При учете того, что термокамера выполнена из керамики внешним диаметром 16 мм, которая радиопрозрачна и термостойка, а стержнем может являться любая магнитная сталь максимально возможного диаметра, автором статьи было установлено, что удобнее всего выполнить индуктор из последовательно соединенных катушек в виде плоской спирали и цилиндрической катушки. В ходе исследования варьировалось количество витков каждой из катушек, так как их общая индуктивность суммируется, то распределение мощности по катушкам трудно предсказать, поэтому необходимо проводить эксперименты. Еще одним важным нюансом является тот факт, что если делать индукторы без теплового зазора, то раскаленной трубке будет некуда расширяться, но и большой зазор негативно скажется на коэффициенте полезного действия (КПД) устройства, т. к. максимальное КПД достигается на расстоянии не более 5 мм от индуктора, следовательно, керамическая

термокамера должна быть достаточно тонкой и в то же время выдерживать циклический нагрев до высоких температур.

Основными характеристиками генераторного блока индукционного нагрева, в соответствии с паспортом, является диапазон рабочих частот, который составляет 20–50 кГц, а также допустима индуктивность индуктора 0,4–0,8 мкГн, следовательно, для более точного расчета необходимо задаваться требуемой индуктивностью 0,4–0,5 мкГн.

В 1926 г. Честер Сноу [7, 8] осуществил успешную попытку создания реалистичной модели цилиндрической катушки с шагом намотки. Разработанная модель схожа с моделью Джеймса Максвелла, только витки в ней представлены не в виде бесконечно тонких круговых замкнутых проводников с током, а в виде бесконечно тонкого спирального проводника. Возможность рассчитать собственную индуктивность цилиндрической катушки с шагом намотки появилась при использовании концепции «геометрического среднего расстояния» Максвелла. Основываясь на результатах предыдущих исследований, Честер Сноу разработал математический метод расчета взаимоиндукции между двумя такими цилиндрическими проводниками, но расчетная формула Сноу была далека от совершенства. Лишь в 2011 г. Роберт Вивер [9], основываясь на методе Сноу, исправил эти недостатки и создал доработанный численный алгоритм расчета индуктивности однослойной катушки с произвольным шагом намотки.

Автором статьи был произведен расчет в приложении Coil64, в котором используется достаточно точный метод для расчета индуктивности однослойной цилиндрической катушки с любым числом витков и произвольным шагом намотки, основанный на алгоритме Роберта Вивера. Учитывая проектные

габариты устройства и необходимые выходные показатели, проводилась серия расчетов, варьировались диаметр каркаса, диаметр провода с изоляцией и без нее, шаг намотки, длина намотки, длина провода, количество витков, а по результатам были выбраны наиболее подходящие для реализации задуманного параметры.

На рис. 1 показана расчетная схема цилиндрической катушки с характеристиками для расчета. При выборе параметров:

материал провода Mt = медь;

число витков катушки $N = 4$;

частота $f = 0,05$ МГц;

диаметр каркаса $D = 28$ мм;

диаметр провода $d = 6$ мм;

диаметр провода с изоляцией $k = 6,54$ мм;

шаг намотки $p = 7$ мм;

длина провода без учета выводов
 $lw = 43,5$ см;

длина намотки $l = 34,5$ мм,

индуктивность составила $L = 0,389$ мкГн.

Но так как индуктор состоит из двух последовательно соединенных катушек, необходимо производить комплексный расчет для получения более точных результатов.

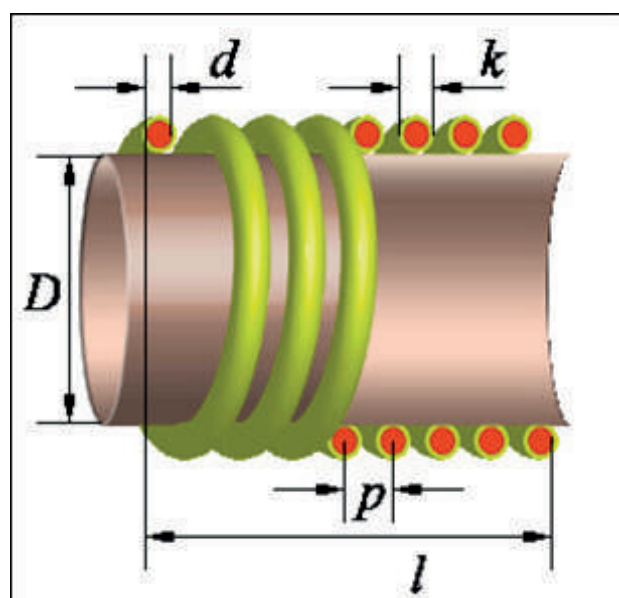


Рис. 1. Расчетная схема цилиндрической катушки

Fig. 1. Calculation scheme of a cylindrical coil

Автором работы был проведен расчет второй составляющей части индуктора, а именно расчет цилиндрической катушки в приложении Coil64, основой которого является расчет методом бесконечно тонких круговых нитей Максвелла. В своем трактате «Электричество и магнетизм» Максвелл теоретически предсказал существование электромагнитных волн и вывел формулу взаимной индукции между двумя бесконечно

тонкими замкнутыми соосными круговыми контурами с током, чем и создал фундаментальную базу для расчета индуктивности. В трактовке данного метода любая круглая катушка рассматривается как набор подобных нитей, в которой число колец соответственно равно числу витков катушки. Максвелл впервые показал, что индуктивность отдельного одиночного витка равна взаимной индукции двух виртуальных нитей

с одинаковым диаметром окружности, расположенных на определенном расстоянии. В случае если фигура поперечного сечения провода занимает определенную площадь, то берется среднегеометрическое расстояние между всеми точками поперечного сечения двух проводников, следовательно, расстояние при использовании круглого провода будет равно расстоянию между осями провода [10].

На рис. 2 показана расчетная схема плоской катушки с характеристиками для расчета. При выборе параметров:

материал провода Mt = медь;

число витков катушки $N = 2$;

частота $f = 0,05$ МГц;

внешний диаметр $Do = 52$ мм;

внутренний диаметр $Di = 28$ мм;

длина провода без учета выводов
 $lw = 45,3$ см

индуктивность составила $L = 0,044$ мкГн.

В ходе проведения исследований были рассчитаны двенадцать вариаций индуктора, в статье представлены расчеты оптимального варианта. Таким образом, если конструировать индуктор, в который входит цилиндрическая катушка на четыре витка (с внутренним диаметром $D = 28$ мм и индуктивностью $L = 0,389$ мкГн) и плоская катушка на два витка (с внутренним диаметром $Di = 28$ мм, внешним диаметром $Do = 52$ мм, индуктивностью $L = 0,044$ мкГн), то в сумме индуктивность индуктора будет равна $L = 0,389 + 0,044 = 0,433$ мкГн, что соответствует показателю, рекомендованному заводом — изготовителем генераторного блока индукционного нагрева.

На рис. 3 показаны некоторые индукторы, примененные входе практического опыта.

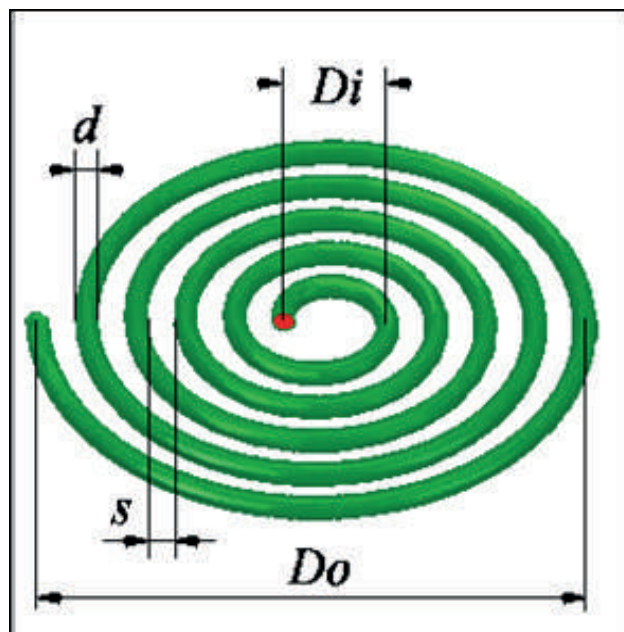


Рис. 2. Расчетная схема плоской катушки

Fig. 2. Calculation scheme of a flat coil



Рис. 3. Индукторы с наибольшей эффективностью

Fig. 3. Inductors with the highest efficiency

В результате проведенных практических опытов, в которых были применены индукторы с разным количеством витков в плоской и цилиндрической части, было установлено, что оптимальным решением стал индуктор,

изготовленный на два витка плоской катушки и четыре витка цилиндрической (рис. 3, поз. 1). На рис. 4 представлен результат вспучивания огнезащитного покрытия с использованием оптимальной конфигурации индуктора.



Рис. 4. Огнезащитное покрытие после проведенных испытаний

Fig. 4. Fire-resistant coating after the tests

Разработанный индуктор показал свою эффективность в ходе проведения практических опытов и может быть при-

менен в устройстве для двустороннего прогрева вспучивающихся огнезащитных покрытий.

Заключение

Для проверки вспучивающегося огнезащитного покрытия крайне необходим полевой метод исследования вспучиваемости такого покрытия. В ходе разработки прототипа устройства, с помощью которого можно проводить исследования такого рода, автором статьи были проведены параллельные теоретические расчеты и практические испытания индукторов, которые являются фундаментальными узлами прототипа. Данные, полученные в ходе расчета, хорошо коррелируют с эмпирическими, что позволяет оптимизировать характеристики устройства.

В данной работе представлены результаты выбора варианта индуктора из двенадцати рассчитанных вариаций. Оптимальный вариант индуктора включает в себя две по-

следовательно соединенных катушки, цилиндрическую на четыре витка с внутренним диаметром 28 мм и плоскую на два витка с внутренним диаметром 28 мм. В индуктор такого формата легко поместится термокамера в виде керамической трубки наружным диаметром 27 мм. Проведенными практическими опытами установлена высокая степень корреляции результатов, следовательно, работоспособность рассчитанного индуктора подтверждена эмпирическим путем.

Для упрощения применимости разработанного прототипа устройства в труднодоступных местах, подверженных огнезащитной обработке, автором статьи планируется оптимизировать конструкцию устройства с точки зрения габаритных размеров, а также провести дополнительные испытания на огнезащитных покрытиях, отличающихся по своей химической природе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганков М. С., Шедько А. М. Роль огнезащитных покрытий в крупнейших пожарах последних лет // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2024. № 2 (14). С. 74–79.
2. Цыганков М. С., Дурновцева П. В., Чернов А. А. Анализ тенденций развития термического анализа, применяемого для идентификации огнезащитной обработки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. Т. 3. С. 70–73.
3. Цыганков М. С., Шедько А. М. Проблема фальсификации на рынке огнезащитных составов для металлоконструкций // Современные проблемы обеспечения безопасности : сб. материалов XXVI Международной научно-практической конференции / ред. колл. М. В. Елфимова [и др.]. Екатеринбург, 2024. С. 123–128.
4. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М., 2018. 488 с.
5. Intumescent coating and fire protection of steel structures / L. Guo-Qiang et al. Boca Raton, 2023. 172 p.
6. Патент № 2814877 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Способ двустороннего высокотемпературного прогрева тонкослойных лакокрасочных покрытий (интумесцентных красок огнезащитного типа) : № 2023116726 : заявл. 23.06.2023 : опубл. 05.03.2024 / М. С. Цыганков // Google Patents : сайт. URL: <https://clck.ru/3Nukhx> (дата обращения: 03.05.2025).

7. Snow, Ch. Formula for the Inductance of a Helix Made With Wire of Any Section. URL: <https://clck.ru/3P2XwQ> (date of application: 26.03.2025).
8. Snow, Ch. A Simplified Precision Formula for the Inductance of a Helix with Corrections for the Lead-In Wires. URL: <https://clck.ru/3P2YCY> (date of application: 26.03.2025).
9. Weaver, R. The Inductance of a Helix of Any Pitch. URL: <https://clck.ru/3P2Yh5> (date of application: 26.03.2025).
10. Maxwell, J. C. To find M by Elliptic Integrals // A Treatise on Electricity and Magnetism / J. C. Maxwell. Dover, 1954. Vol. 2, Art. 701. pp. 338–340.

REFERENCES

1. Tsygankov M. S., Shedko A. M. The role of fire-resistant coatings in the largest fires of recent years // Current security issues in the technosphere. 2024. № 2 (14). pp. 74–79.
2. Tsygankov M. S., Durnovtseva P. V., Chernov A. A. Analysis of trends in the development of thermal analysis used to identify flame retardant treatment // Interexpo Geo-Siberia. 2024. Vol. 3. pp. 70–73.
3. Tsygankov M. S., Shedko A. M. The problem of falsification in the market of flame retardants for metal structures // Modern problems of safety: Collection of materials of the XXVI scientific and practical International Conference. Yekaterinburg, 2024. pp. 123–128.
4. Pavlovich A. V., Drinberg A. S., Mashlyakovskiy L. N. Flame-retardant bulging paint and varnish coatings. M., 2018. 488 p.
5. Intumescent coating and fire protection of steel structures / L. Guo-Qiang et al. Boca Raton, 2023. 172 p.
6. Patent № 2814877 C1 Russian Federation, IPC G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Method of double-sided high-temperature heating of thin-layer paint coatings (intumescent paints of flame-retardant type) : № 2023116726 : application 23.06.2023 : published 05.03.2024 / M. S. Tsygankov // Google Patents. URL: <https://clck.ru/3Nukhx> (date of application: 03.05.2025).
7. Snow, Ch. Formula for the Inductance of a Helix Made With Wire of Any Section. URL: <https://clck.ru/3P2XwQ> (date of application: 26.03.2025).
8. Snow, Ch. A Simplified Precision Formula for the Inductance of a Helix with Corrections for the Lead-In Wires. URL: <https://clck.ru/3P2YCY> (date of application: 26.03.2025).
9. Weaver, R. The Inductance of a Helix of Any Pitch. URL: <https://clck.ru/3P2Yh5> (date of application: 26.03.2025).
10. Maxwell, J. C. To find M by Elliptic Integrals // A Treatise on Electricity and Magnetism / J. C. Maxwell. Dover, 1954. Vol. 2, Art. 701. pp. 338–340.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Цыганков Михаил Сергеевич, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); SPIN-код: 7154-4897; e-mail: 33mixan33@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail S. Tsygankov, adjunct of Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105); SPIN code: 7154-4897; e-mail: 33mixan33@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2025

Одобрена после рецензирования 12.05.2025

Принята к публикации 15.09.2025

УДК 004.032.26:614.84

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ВИДЕОПОТОКЕ

Емельянов Никита Алексеевич

Главное управление МЧС России по Красноярскому краю, г. Красноярск, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованию применения современных нейросетевых алгоритмов и машинного обучения для автоматического обнаружения признаков пожара на видеопотоке. В условиях роста требований к скорости реагирования и точности мониторинга возгораний традиционные системы, основанные на физических сенсорах, демонстрируют ряд ограничений. В связи с этим возрастающий интерес представляют интеллектуальные методы анализа изображений на основе компьютерного зрения и глубокого обучения. Рассмотрены ключевые архитектуры нейросетей, включая YOLOv3, YOLOv5, EfficientDet и FireNet, обладающие высокой точностью детекции объектов в режиме реального времени и адаптивностью к различным условиям съемки. Проведен сравнительный анализ моделей по таким критериям, как точность, полнота, скорость обработки (FPS), устойчивость к ложным срабатываниям и требования к вычислительным ресурсам. Приведены результаты практического применения нейросетевых решений в промышленных, муниципальных и распределенных IoT-системах. Показано, что внедрение нейросетей позволяет существенно сократить среднее время обнаружения пожара (до 5–10 с) и повысить надежность работы систем видеонаблюдения. В заключение рассмотрены перспективные направления развития технологий интеллектуальной пожарной безопасности, такие как мультисенсорная интеграция, обучение моделей на специализированных выборках и создание нормативной базы для сертификации подобных систем. Сделаны выводы о высоком потенциале нейросетевых подходов для обеспечения раннего выявления пожаров и минимизации ущерба.

Ключевые слова: видеомониторинг, компьютерное зрение, обнаружение пожара, сверточные нейросети, распознавание дыма, YOLOv5, FireNet

Для цитирования: Емельянов Н. А. Применение нейросетевых алгоритмов и машинного обучения для автоматического обнаружения пожаров на видеопотоке // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 13–23.

APPLICATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS AND MACHINE LEARNING FOR AUTOMATIC FIRE DETECTION IN VIDEO STREAM

Nikita A. Emelyanov

Main Directorate of EMERCOM of Russia for Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to studies of the application of modern neural network algorithms and machine learning for automatic detection of fire signs in a video stream. In the context of increasing requirements for response speed and accuracy of fire monitoring, traditional systems based on physical sensors demonstrate a number of limitations. In this regard, intelligent methods of image analysis based on computer vision and deep learning are of increasing interest. The key architectures of neural networks are considered, including YOLOv3, YOLOv5, EfficientDet and FireNet, which have high accuracy of object detection in real time and adaptability to various shooting conditions. A comparative analysis of the models is carried out according to such criteria as accuracy, completeness, processing speed (FPS), resistance to false positives and requirements for computing resources. The results of practical application of neural network solutions in industrial, municipal and distributed IoT systems are presented. It is shown that the implementation of neural networks can significantly reduce the average fire detection time (up to 5-10 seconds) and increase the reliability of video surveillance systems. In conclusion, promising areas of development of intelligent fire safety technologies are considered, such as multisensory integration, training models on specialized samples and the creation of a regulatory framework for certification of such systems. Conclusions are made about the high potential of neural network approaches for ensuring early detection of fires and minimizing damage.

Keywords: video monitoring, computer vision, fire detection, convolutional neural networks, smoke recognition, YOLOv5, FireNet

For Citation: Emelyanov N. A. Application of neural network algorithms and machine learning for automatic fire detection in video stream // *Technospheric safety*. 2025. № 3 (48). pp. 13–23.

Введение

Пожары продолжают оставаться одной из наиболее разрушительных и трудно прогнозируемых чрезвычайных ситуаций. Несмотря на активное развитие нормативной базы, автоматизации систем оповещения и тушения, потери от пожаров в жилом, промышленном и природном секторах остаются крайне высокими. Наиболее критичным фактором по-прежнему выступает время реагирования.

Традиционные системы обнаружения, основанные на использовании датчиков температуры, дыма или открытого пламени, обладают рядом существенных ограничений. Они имеют ограниченный радиус действия, часто срабатывают с задержкой,

не способны дать информацию о типе или масштабах угрозы, а также подвержены ложным срабатываниям — например, в условиях задымления, перепадов температуры или работы техники. Кроме того, такие системы нередко существуют обособленно от видеонаблюдения и не обеспечивают визуальную верификацию происшествия.

На этом фоне возрастает интерес к использованию нейросетевых алгоритмов в системах визуального мониторинга. Такие модели способны в реальном времени распознавать признаки возгорания на видеопотоке, включая дым и пламя. Современные архитектуры, такие как YOLO и FireNet, демонстрируют высокую точность при оперативной скорости реагирования и низком уровне ложных срабатываний.

Целью данной статьи является обзор и сравнительный анализ современных нейросетевых моделей, применяемых для автоматического обнаружения пожаров по видеопотоку, с оценкой их эффективности, применимости и ограничений в контексте задач повышения пожарной безопасности.

Основная часть

1. Подходы к задаче видеодетекции пожаров

Задача автоматического выявления признаков пожара на видеопотоке относится к классу задач компьютерного зрения. Применяемые методы можно разделить на две группы: классические алгоритмы и методы, основанные на обучении.

Классические алгоритмы анализируют визуальные параметры изображения — изменение яркости, движение пикселей, доминирующие цветовые компоненты (красный, оранжевый), контурные особенности. Эти подходы не требуют предварительного обучения и легко реализуются, однако они крайне чувствительны к внешним помехам: солнечным бликам, отблескам фар, теням и движущимся объектам, не связанным с возгоранием. Это приводит к высокой частоте ложных срабатываний [1].

Нейросетевые методы используют обученные модели, способные различать пожар и визуально схожие объекты, опираясь на контекст видеопотока. Для обучения таких моделей применяются размеченные датасеты изображений и видеозаписей, содержащих фото и видео с дымом, пламенем, задымленностью, а также нейтральные кадры. Благодаря этому нейросети демонстрируют значительно более высокую точность и устой-

чивость к ложным срабатываниям по сравнению с классическими методами [2, 3].

2. Обзор нейросетевых архитектур и обучающих выборок

Нейросетевые архитектуры

Наиболее эффективными в задачах видеодетекции пожара считаются архитектуры, основанные на сверточных нейронных сетях (CNN), а также одностадийные детекторы объектов [4]:

- YOLO (You Only Look Once) — одна из наиболее популярных и результативных архитектур, реализующая одностадийный подход к распознаванию объектов. Модели последних поколений (YOLOv5, YOLOv8) обеспечивают высокую точность (до 92 %) при скорости обработки в реальном времени, что делает их подходящими для применения даже на потребительских GPU [5, 6].
- EfficientDet и MobileNet SSD — компактные архитектуры, ориентированные на энергоэффективность и возможность работы на мобильных или edge-устройствах. Они демонстрируют сбалансированные характеристики по точности (87–90 %) и скорости и особенно эффективны в задачах, где критичны ограничения по ресурсам [7].
- Vision Transformers (ViT) — относительно новый класс моделей, основанный на архитектуре трансформеров. ViT демонстрирует высокую точность, особенно при наличии большого объема обучающих данных, но требует значительно больше вычислительных ресурсов, чем CNN [8].

В зависимости от задачи модели могут решать:

- бинарную классификацию (наличие/отсутствие признаков пожара);
- детекцию с локализацией (указание координат огня);
- семантическую сегментацию, позволяющую выделять области пламени и оценивать их форму и распространение.

Обучение моделей обычно проводится с использованием фреймворков PyTorch или TensorFlow, часто с применением transfer learning — дообучения моделей на специализированных датасетах.

Качество работы моделей оценивается по следующим метрикам:

- Precision/Recall — точность и полнота обнаружения;
- F1-score — гармоническое среднее между ними;
- FPS (Frames Per Second) — число кадров в секунду, отражающее способность модели работать в режиме реального времени.

Обучающие и тестовые датасеты

Для обучения и валидации моделей применяются открытые датасеты, содержащие видеоматериалы и изображения с пожарами, дымом и нейтральными сценами. Наиболее распространенные:

- FIRESENSE — крупный датасет, включающий видеозаписи с камер наблюдения, преимущественно уличных, в различных погодных и световых условиях. Используется для обучения моделей в условиях естественной среды [2].
- Corsican Fire Dataset — содержит разнообразные сцены с открытым пламенем, дымом и их сочетаниями. Применяется в задачах бинарной классификации и объектной локализации [3].
- FireNet Dataset, FMDS — специализированные наборы данных, разработанные

для обучения моделей обнаружения пожаров в закрытых помещениях (здания, склады, ангары). Отличаются высоким качеством разметки и широким набором сценариев задымления [9].

Использование разнообразных по структуре и сложности датасетов позволяет моделям обобщать полученные знания и адаптироваться к новым условиям в реальных системах видеонаблюдения.

3. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для видеодетекции пожаров

Выбор подходящей архитектуры нейросети для задач видеомониторинга во многом зависит от условий эксплуатации, требований к точности, скорости обработки и доступных ресурсов.

Для объективной оценки эффективности нейросетевых моделей, применяемых в системах автоматического обнаружения пожаров, используются несколько ключевых метрик. Каждая из них отражает определенный аспект поведения модели и помогает подобрать решение под конкретные условия эксплуатации [10]:

- Точность (Accuracy) — доля правильно классифицированных кадров по отношению ко всем проанализированным кадрам.
- Полнота (Recall) — показывает, какую долю реальных пожаров модель сумела правильно обнаружить.
- Точность распознавания (Precision) — доля корректных детекций пожара среди всех случаев, когда модель «считала», что пожар есть.
- F-мера — объединенная метрика, которая рассчитывается как гармоническое среднее между precision и recall:

$$F = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

(1)

F-мера дает взвешенную оценку качества модели в условиях, когда необходимо одновременно минимизировать как пропуски реальных возгораний, так и ложные срабатывания. В задачах пожарной безопасности эта метрика особенно важна, т. к. упор делается не только на надежность, но и на своевременность реагирования [10].

- FPS (Frames Per Second) — количество кадров в секунду, которое может обрабатывать модель.
- В таблице представлены обобщенные характеристики наиболее популярных моделей, полученные на основе анализа данных из открытых исследований и сравнительных испытаний [4–8].

Таблица

Сравнительные характеристики нейросетевых моделей, применяемых для обнаружения пожаров

Table

Comparative characteristics of neural network models used for fire detection

Модель Model	Точность Accuracy	F-мера F-score	Ложные тревоги False alarms	Скорость обработки (FPS)	Особенности применения Specifics
YOLOv5	до 92 % up to 92 %	91 %	4–6 %	45–60	Системы видеонаблюдения, мобильные GPU Surveillance systems, mobile GPUs
YOLOv4	до 95 % up to 95 %	94 %	4 %	30–45	Промышленный контроль, автономные станции Industrial monitoring, autonomous stations
YOLOv3	до 88 % up to 88 %	86 %	6–8 %	25–35	Пилотные проекты, дроны, исследовательские цели Pilot projects, drones, research tasks
EfficientDet D0	87–90 %	86–89 %	5–8 %	25–40	Edge-устройства, системы с ограниченными ресурсами Edge devices, resource-limited systems
FireNet	84–88 %	82 %	8–12 %	15–25	IoT, устройства с малым объемом памяти IoT, low-power devices

Как видно из данных приведенной таблицы, наилучшие результаты по совокупности параметров демонстрируют модели семейства YOLO —особенно версии v4 и v5. Они обеспечивают высокий уровень точности, при этом сохраняя скорость, необходимую для работы в условиях реального времени. Это делает их предпочтительными для использо-

вания в интегрированных системах безопасности на объектах с высоким уровнем риска.

4. Архитектура системы видеодетекции на основе нейросетей

Для реализации автоматического распознавания признаков возгорания в реальных

условиях применяется модульный подход, позволяющий интегрировать нейросетевые модели в существующие системы видеонаблюдения или создавать автономные решения, работающие в режиме реального времени. Структурно такая система состоит из нескольких ключевых блоков:

- источник видеосигнала — видеокамера, беспилотный летательный аппарат (БПЛА) или мобильное устройство, обеспечивающее потоковое изображение;
- модуль предварительной обработки — выполняет масштабирование, нормализацию и фильтрацию изображений, подготавливает данные для подачи в модель;
- нейросетевая модель — основное ядро системы, реализующее функцию детекции. В зависимости от архитектуры

(YOLO, FireNet, EfficientDet и др.) модель может выполнять бинарную классификацию, детекцию объектов или сегментацию области пожара;

- модуль принятия решения — осуществляет логическую обработку результатов модели;
- интерфейс оповещения — отправка сигнала оператору, автоматическое включение пожарной сигнализации, запись события в лог или передача данных на сервер.

Такая архитектура (рис. 1) обеспечивает масштабируемость, независимость от конкретного оборудования и возможность адаптации под различные сценарии: от городской инфраструктуры до лесных массивов и промышленных объектов.

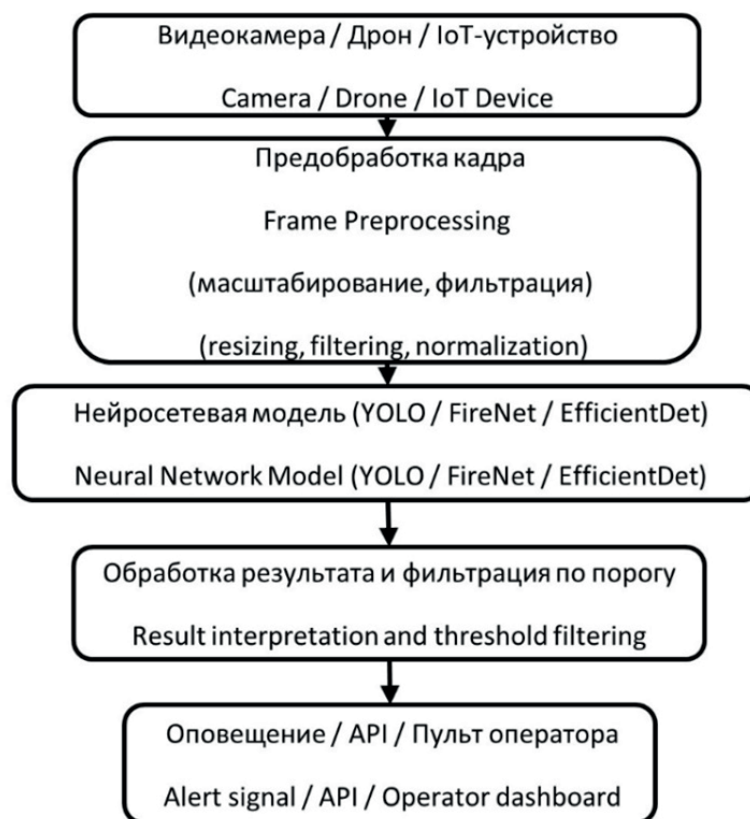


Рис. 1. Архитектура системы видеодетекции пожара на основе нейросетей

Fig. 1. Architecture of a fire video detection system based on neural networks

5. Практические примеры применения

Реализация нейросетевых систем для автоматического обнаружения пожаров уже получила подтверждение в ряде прикладных и исследовательских проектов как в России, так и за рубежом.

Пример 1. YOLOv3 на базе Darknet (Россия)

В исследовании [5] использовалась модель YOLOv3 для распознавания возгораний на изображениях и видеокдрах, полученных с различных точек съемки (уровень глаз, дроны, вертолеты). Для обучения применялась выборка из 1539 изображений, извлеченных из видеоматериалов, снятых в Австралии, Австрии, Бразилии, Китае и Украине. Выборка была разбита на тренировочную (1176),

валидационную (182) и тестовую (181) подмножества.

Обучение проводилось с использованием фреймворка Darknet, на языке Python с библиотеками OpenCV и NumPy. Были получены следующие метрики:

- Precision — до 70 %;
- Recall — около 58 %;
- F-мера — 53 %;
- средняя точность (mAP) — 48,12 %;
- FPS — 25–30 при использовании GPU [5].

Данный пример подтвердил эффективность даже относительно простой архитектуры при наличии достаточно качественного и разнообразного обучающего набора. Примеры работы обученной модели при обработке видеофайла и изображений приведены на рис. 2 и 3 соответственно.



Рис. 2. Пример работы программы на видеофайле

Fig. 2. An example of how the program works on a video file



Рис. 3. Пример работы программы на изображении

Fig. 3. An example of how the program works in the image

Пример 2. YOLOv5 в промышленных системах видеонаблюдения

YOLOv5 применяется в ряде промышленных решений, в т. ч. в энергетике и нефтехимии, где необходимо оперативное реагирование на возгорания в зонах с высокой плотностью оборудования. В проектах, описанных в [1, 6], YOLOv5 достигала точности до 92 % и скорости обработки до 60 кадров в секунду. Благодаря гибкой архитектуре модель дообучалась на локальных данных, что позволяло снижать количество ложных срабатываний до уровня 4–6 %.

Интеграция проводилась в виде модулей, встроенных в системы видеонаблюдения, с возможностью автоматического формирования тревожных событий при превышении порога уверенности классификатора.

Пример 3. FireNet на edge-устройствах

FireNet, разработанная как легкая модель для IoT-среды, применяется в логистических центрах, складах и помещениях без устойчивого интернет-соединения. В исследовании [2] модель работала на устройстве Raspberry Pi с применением локального видеопотока и обеспечивала:

- точность — до 88 %;
- скорость — 15–20 FPS;
- уровень ложных срабатываний — 8–12 %.

Главным преимуществом FireNet остается возможность автономной работы и низкое потребление ресурсов, что делает ее применимой в edge-инфраструктуре [2, 7].

Таким образом, практические примеры подтверждают, что выбор модели напрямую зависит от условий эксплуатации: производительности оборудования, сценариев применения и требований к автономности. При этом нейросетевые решения, особенно YOLOv5 и FireNet, уже сегодня демон-

стрируют высокую эффективность и пригодность к промышленной интеграции.

6. Практические примеры применения

Внедрение нейросетевых алгоритмов в системы противопожарного мониторинга открывает широкие возможности для повышения эффективности обнаружения возгораний. Вместе с тем, как и любая быстро развивающаяся технология, данный подход сопряжен с рядом как перспективных направлений, так и объективных ограничений.

Перспективные направления развития:

- Мультимодальные системы: объединение видеодетекции с тепловизорами, акустическими датчиками и газоанализаторами позволит повысить надежность и снизить вероятность ложных срабатываний.
- Интеграция с беспилотными платформами (БПЛА): использование дронов с установленными нейросетевыми модулями позволяет проводить мониторинг труднодоступных территорий: лесов, карьеров, промышленных зон.
- Самообучающиеся системы (continual learning): разработка моделей, способных адаптироваться к новым условиям без полной переобучаемости, является перспективным направлением для работы в нестабильных или уникальных средах.
- Облачные и edge-решения: перенос вычислений в распределенные системы (edge computing) с частичной обработкой в облаке дает гибкость масштабирования и снижает нагрузку на локальное оборудование.

Ограничения и проблемы:

- Отсутствие национальных стандартов и сертификации: в России на данный

момент отсутствуют официально утвержденные методики испытаний и сертификации ИИ-систем детекции пожаров. Это ограничивает внедрение в ответственные объекты.

- Зависимость от качества видеопотока: нейросетевые модели чувствительны к искажениям изображения — плохое освещение, низкое разрешение и сжатие сигнала могут снизить точность детекции.
- Необходимость обширной и релевантной обучающей выборки: недостаток качественно размеченных российских датасетов снижает универсальность моделей, особенно в условиях отечественной архитектуры зданий и климата.
- Ресурсоемкость моделей: высокоточные модели требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения, что может ограничить их применение в маломощных системах и автономных устройствах.

Таким образом, несмотря на очевидную эффективность нейросетевых решений, их широкомасштабное внедрение требует как технической доработки, так и создания нормативно-правовой и методической базы. Устранение перечисленных барьеров станет ключом к формированию новой генерации интеллектуальных систем противопожарной безопасности.

Заключение

Нейросетевые технологии, применяемые для автоматического обнаружения признаков пожара на видеопотоке, демонстрируют высокую эффективность и практиче-

скую применимость в системах мониторинга различных масштабов — от промышленных объектов до распределенных IoT-решений. Проведенный обзор архитектур (YOLOv3/v4/v5, EfficientDet, FireNet) и сопоставление их характеристик показали, что современные модели способны достигать точности до 95 %, снижать уровень ложных срабатываний до 4–6 % и обеспечивать обработку в режиме реального времени (до 60 FPS).

Практические примеры реализации таких решений подтвердили, что нейросети успешно решают задачи как детекции, так и локализации пожаров, а в некоторых случаях — и сегментации. Легкие модели (например, FireNet) демонстрируют хорошую применимость в условиях ограниченных ресурсов и автономной работы.

Тем не менее широкое внедрение этих решений сдерживается рядом ограничений: отсутствием национальных стандартов и сертификаций, недостатком локальных датасетов, а также требовательностью к качеству видеопотока. Устранение этих барьеров в ближайшие годы станет важной задачей для научного сообщества и разработчиков систем безопасности.

Таким образом, нейросетевые методы обнаружения пожаров следует рассматривать не как альтернативу традиционным средствам, а как мощное дополнение, повышающее надежность, скорость и интеллектуальный уровень систем противопожарной защиты. В условиях стремительного развития искусственного интеллекта именно такие решения становятся фундаментом для построения адаптивных, масштабируемых и самонастраивающихся систем техносферной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mahmoud, H., Alharbi, A., Alghamdi, N. Time-Efficient Fire Detection Convolutional Neural Network Coupled with Transfer Learning // Intelligent Automation & Soft Computing. 2022. Vol. 31 (3). pp. 1393–1403.
2. FireNet: A specialized lightweight fire & smoke detection model for real-time IoT applications / A. Jadon et al. // Measurement. 2019. Vol. 188. P. 110390.
3. Zhang, D., Chen, Y. Lightweight Fire Detection Algorithm Based on improved YOLOv5 // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2024. Vol. 15.
4. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon et al. URL: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (date of application: 26.03.2025).
5. Дамдынчап Ч. А., Шарапов А. А. Применение нейронных сетей для распознавания дыма и пожара на изображениях // Сибирский государственный университет геосистем и технологий. 2021. № 2. С. 38–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47252055> (дата обращения: 23.03.2025).
6. Fire detection using deep learning methods / A. Bayegizova et al. // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2024. Vol. 14 (1). pp. 547–555.
7. Fire Detection Using Deep Learning / G. Suhas et al. // International Journal of Progressive Research in Science and Engineering (IJECE). 2020. Vol. 1 (5). pp. 1–5. URL: <https://journal.ijprse.com/index.php/ijprse/article/view/141> (date of application: 26.03.2025).
8. Калиев Д. И., Швец О. Я. Сверточные нейронные сети для решения задач обнаружения пожаров по данным аэрофотосъемки // Программные системы: теория и приложения. 2022. Т. 13, № 1. С. 195–213.
9. Redmon, J., Farhadi, A. YOLOv3: An Incremental Improvement. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (date of application: 26.03.2025).
10. Goodfellow I., Bengi Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p. URL: <https://www.deeplearningbook.org> (date of application: 26.03.2025).

REFERENCES

1. Mahmoud, H., Alharbi, A., Alghamdi, N. Time-Efficient Fire Detection Convolutional Neural Network Coupled with Transfer Learning // Intelligent Automation & Soft Computing. 2022. Vol. 31 (3). pp. 1393–1403.
2. FireNet: A specialized lightweight fire & smoke detection model for real-time IoT applications / A. Jadon et al. // Measurement. 2019. Vol. 188. P. 110390.
3. Zhang, D., Chen, Y. Lightweight Fire Detection Algorithm Based on improved YOLOv5 // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2024. Vol. 15.
4. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon et al. URL: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (date of application: 26.03.2025).
5. Damdynchap, Ch. A., Sharapov, A. A. Application of neural networks for smoke and fire detection in images // Siberian State University of Geosystems and Technologies. 2021. № 2. pp. 38–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47252055> (date of application: 26.03.2025).

6. Fire detection using deep learning methods / A. Bayegizova et al. // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2024. Vol. 14 (1). pp. 547–555.
7. Fire Detection Using Deep Learning / G. Suhas et al. // International Journal of Progressive Research in Science and Engineering (IJECE). 2020. Vol. 1 (5). pp. 1–5. URL: <https://journal.ijprse.com/index.php/ijprse/article/view/141> (date of application: 26.03.2025).
8. Kaliev, D. I., Shvets, O. Ya. Convolutional neural networks for solving fire detection problems based on aerial photography data // Software Systems: Theory and Applications. 2022. Vol. 13, № 1. pp. 195–213.
9. Redmon, J., Farhadi, A. YOLOv3: An Incremental Improvement. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (date of application: 26.03.2025).
10. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p. URL: <https://www.deeplearningbook.org> (date of application: 26.03.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Емельянов Никита Алексеевич, инженер отдела организации службы пожарно-спасательных подразделений управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Красноярскому краю (660049, Российская Федерация, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Мира, д. 68); Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: yemelyanovna@24.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikita A. Emelyanov, Engineer, Department of Organization of Fire and Rescue Units, Department of Firefighting and Emergency Rescue Operations, Main Directorate of the EMERCOM of Russia for Krasnoyarsk Territory, Russian Federation (68 Mira St., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation); Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: yemelyanovna@24.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 14.05.2025
Одобрена после рецензирования 20.05.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.841.41

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКСИЧНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОЖАРЕ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ФОРМ-ФАКТОРА 18650

Терентьев Дмитрий Иванович, Кокшаров Александр Викторович, Сатюков Роман Сергеевич
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Литий-ионные аккумуляторы представляют собой сложносоставную горючую нагрузку, пожаровзрывоопасные свойства которой в полной мере не изучены. Это обстоятельство подталкивает к изучению особенностей горения различных видов литий-ионных аккумуляторов. В дальнейшем, в случае накопления достаточного количества подробной информации о пожаровзрывоопасных свойствах данной горючей нагрузки, появится возможность учесть присутствие литий-ионных аккумуляторов на объектах защиты при оценке пожарных рисков. В статье рассмотрена специфика образования токсичной газовой среды, а также освещены особенности горения кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторов форм-фактора 18650 при наличии внешнего источника нагрева. По результатам проведенных экспериментов выполнены оценки средних величин удельной скорости выгорания, коэффициентов выделения углекислого и угарного газов, потребления кислорода при сгорании кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов форм-фактора 18650. Показано, что возгорание литий-ионных аккумуляторных элементов сопровождается не только горением струи выделяющихся горючих газов и материалов, но и выбросами частей конструкции и пылевых остатков электродных масс, содержащих значительные количества токсичных оксидов лития, кобальта, алюминия. В результате общая токсичность газовой среды на пожаре при горении литий-ионных аккумуляторов значительно увеличивается.

Ключевые слова: пожарная безопасность, литий-ионные аккумуляторы, опасность взрыва, свойства горючей нагрузки, самовоспламенение, математическая модель пожара, оценка пожарных рисков

Для цитирования: Терентьев Д. И., Кокшаров А. В., Сатюков Р. С. Особенности формирования токсичной газовой среды в помещении при пожаре кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных батарей, составленных из элементов форм-фактора 18650 // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 24–32.

FEATURES OF THE FORMATION OF THE TOXIC GAS ENVIRONMENT IN A ROOM DURING A FIRE IN COBALT-CONTAINING LITHIUM-ION BATTERIES COMPOSED OF 18650 FORM FACTOR CELLS

Abstract. Lithium-ion batteries are a complex combustible load, the fire and explosive properties of which have not been fully studied. This fact encourages us to study the combustion characteristics of various types of lithium-ion batteries. In the future, if enough detailed information is accumulated on the fire and explosion properties of this combustible load, it will be possible to take into account the presence of lithium-ion batteries at protected facilities when assessing fire risks. In this paper, the specifics of the formation of the toxic gas environment are considered, the features of the combustion of cobalt-containing lithium-ion batteries of the 18650 form factor in the presence of an external heating source are also highlighted. Based on the results of the experiments, estimates of carbon dioxide and carbon monoxide gases, oxygen consumption during combustion of cobalt-containing lithium-ion battery cells of the 18650 form factor were made. It is shown that the ignition of lithium-ion battery cells is accompanied not only by the combustion of a stream of emitted flammable gases and materials, but also by emissions of parts of the structure and dust residues of electrode masses containing significant amounts of toxic oxides of lithium, cobalt, and aluminum. As a result, the overall toxicity of the gas environment during a fire when lithium-ion batteries are burning increases significantly.

Keywords: fire safety, lithium-ion batteries, explosion hazard, flammable load properties, spontaneous combustion, mathematical model of fire, fire risk assessment

For Citation: Terentiev D. I., Koksharov A. V., Satukov R. S. Features of the formation of the toxic gas environment in a room during a fire in cobalt-containing lithium-ion batteries composed of 18650 form factor cells // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 24–32.

Экспериментальное определение пожароопасных свойств кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов форм-фактора 18650 при внешнем нагревании

С целью определения пожароопасных свойств кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторов было проведено несколько экспериментов, в ходе которых аккумуляторные элементы форм-фактора 18650 подвергались внешнему нагреву выше 300 °С.

Экспериментальная установка представляла собой комплекс, включающий плиту нагревательную УН-4550.ULAB, держатель

аккумуляторного элемента, емкость из нержавеющей стали (50 л) для сбора продуктов сгорания, газоанализатор многокомпонентный переносной АГМ-510 и установку измерения температуры с набором термопар.

В ходе каждого эксперимента одиночный полностью заряженный литий-ионный аккумуляторный элемент 18650 (Samsung ICR 30A) помещался в установленный на нагревательную плиту держатель, выходное отверстие которого было направлено в приемное окно емкости для сбора продуктов горения. Для выполнения измерений концентраций газовых продуктов сгорания в емкости имелись отверстия для

щупа газоанализатора и устройства перемешивания газовой среды.

Исходная масса литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 составляла 46,4–47,2 г. Примерный исходный массовый состав исследованных аккумуляторных элементов 18650 ICR приведен в [1].

Эксперименты показали, что для принудительного воспламенения аккумуляторного элемента 18650 с помощью внешнего нагрева в экспериментальной установке требовалось 15–18 мин, при этом наружная температура его корпуса достигала 250 °С. Собственно возгорание представляло со-

бой резкий выброс искро-газовой пламенной струи, которое длилось примерно 1–2 с, после чего наблюдалось остаточное пламенное горение из отверстия предохранительного клапана аккумуляторного элемента в течение еще примерно 6 с.

Выяснилось, что при выходе искро-газовой струи происходит энергичный «отстрел» стального намоточного стержня (сердечника) с прикрепленными к нему частями ленты медного электрода и электродных масс (рис. 1) через отверстие предохранительного клапана в корпусе аккумуляторного элемента.



Рис. 1. Внешний вид сердечника после «отстрела» из воспламенившегося аккумуляторного элемента 18650

Fig. 1. The appearance of the core after "shooting" from the ignited 18650 battery cell

Описываемый «отстрел» оказывается достаточно энергичным, чтобы вызывать сдвиг держателя аккумуляторного элемента массой 150 г по поверхности нагревательной плиты на 10–12 см в сторону, противоположную направлению вылета искро-газовой струи. Такой эффект отдачи наблюдался в случае установки аккумуляторного элемента в держатель в горизонтальном направлении.

Выброшенные при отстреле сердечника частицы углерода, оксидов металлов, кусков медной и мелких чешуек обгоревшей алюминиевой фольги образуют пылевой остаток, который в ходе проведения эксперимента оседал в емкости для сбора газообразных продуктов горения.

Остатки алюминиевого электрода после сгорания представляют собой мелкие хрупкие чешуйки незначительной массы, кроме

одного случая, когда в емкости для сбора газов был найден тонкий слиток звездчатой формы массой 0,8 г размером 20 × 20 мм (рис. 2).

В другом случае сердечник застрял в предохранительном клапане аккумуляторного элемента, так что при выходе газовой струи вылет обрывков электродных лент и других частей конструкции не наблюдался.

Средняя масса твердых остатков аккумуляторного элемента 18650 (корпус вместе

с собранными намоточным стержнем, частями медного электрода и пылевидными остатками электродных масс) составила 35 г. Средняя масса «выстреливаемого» пылевого остатка составила 8 г.

Таким образом, данная горючая нагрузка характеризуется большой долей негорючих компонентов. Активно сгорающая часть составляет не более 25 % от исходной массы аккумуляторного элемента.



Рис. 2. Слиток алюминия, образовавшийся при воспламенении одного из аккумуляторных элементов 18650

Fig. 2. An aluminum ingot formed when one of the 18650 battery cells ignited

Результаты проведенного газоанализа позволили оценить средние величины коэффициентов выделения CO , CO_2 и потребления кислорода при сгорании данного вида горючей нагрузки. Полученные численные значения приведены в таблице.

Как видно из данных таблицы, величина расчетной удельной скорости газификации (выгорания) горючей нагрузки оказалась очень высокой в сравнении с показателями других типовых горючих нагрузок. Это объясняется тем фактом, что при горении литий-ионных аккумуляторов присутствует

скрытая фаза пиролиза компонентов, в результате чего накапливается внутреннее давление и достигаются условия для последующего скоростного выделения и воспламенения горючих материалов.

Помимо угарного и углекислого газов, а также возможных несгоревших паров электролитов и других продуктов взаимодействия [2–9], дополнительный вклад в токсичность газовой среды на пожарах с участием литий-ионных аккумуляторных элементов вносят аэрозоли оксидов лития, алюминия и кобальта, формирующие пылевое облако в области

Таблица

Средние величины коэффициентов выделения CO и CO₂, потребления O₂ и скорости выгорания литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 Samsung ICR 30A

Table

Average values of CO and CO₂ emission coefficients, O₂ consumption burn-out rate of 18650 Samsung ICR 30A lithium-ion battery cells

№	Наименование величины Name of the property	Обозначение, единица измерения Designation, unit of measurement	Значение Value
1	Коэффициент выделения углекислого газа Carbon dioxide emission coefficient	LCO ₂ [кг/кг] [kg/kg]	0,3 ± 0,03
2	Коэффициент выделения угарного газа Carbon monoxide emission coefficient	LCO [кг/кг] [kg/kg]	0,0019 ± 0,0002
3	Коэффициент потребления кислорода Oxygen consumption coefficient	LO ₂ [кг/кг] [kg/kg]	0,23 ± 0,02
4	Удельная скорость выгорания Specific burnout rate	Ψ _{уд'} кг/м ² ·с kg/m ² ·s	3,0 ± 0,3

выхода искро-газовой струи. Оксиды лития и алюминия являются веществами, раздражающими слизистые, и способны вызвать одышку [4–6]. Оксид кобальта считается чрезвычайно опасным в случае длительного воздействия [7], а в условиях пожара оказывает раздражающее влияние на кожу и слизистые, способен нарушить дыхание.

Предварительный анализ химического состава пылевого остатка, выделяющегося при сгорании кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных элементов

Пылевые остатки, собранные в камере для сбора газовых продуктов горения, при промывании водой показывают выраженную щелочную реакцию (pH ~ 9–10), что указывает на присутствие значительных количеств оксида лития.

При обработке части пылевого остатка серной кислотой с последующим фильтрованием образуется раствор с характерным

розово-лиловым окрашиванием, указывающим на присутствие значительных количеств соединений кобальта (II).

Определение количественного содержания соединений кобальта в пылевом остатке, выделяемом при сгорании аккумуляторного элемента Samsung ICR 30A, было выполнено с использованием спектрофотометра UNICO 1201. Предварительная калибровка прибора выполнялась с использованием растворов, приготовленных из шестиводного азотнокислого кобальта марки «Ч». Спектрофотометрический анализ пылевого остатка, собранного после проведения экспериментов из емкости для сбора газовых продуктов, показал, что из каждого сгоревшего элемента Samsung ICR 30A при прорыве газовой струи выделяется в среднем 3,3 г оксида кобальта.

Из полученной информации следует, что воспламенение аккумуляторных элементов 18650 приводит к выбросу приблизительно трети от исходного количества электродных

масс. При условии, что соотношение компонентов в пылевом остатке сохраняется примерно равным их содержанию в исходных электродных массах, следует ожидать, что пылевой остаток также содержит около 2,4 г углерода и 0,7 г оксида лития. Кроме того, в состав пылевого остатка входит около 1,5 г оксида алюминия. Значит, сгорание алюминиевого электрода следует считать неполным.

Выводы

Воспламенению принудительно нагретого кобальтсодержащего литий-ионного аккумуляторного элемента форм-фактора 18650 (и ему подобных) предшествует скрытый период пиролиза компонентов, приводящий к накоплению внутреннего давления в корпусе элемента. Непосредственно горение представляет собой резкий (до 2 с) выброс искро-газовой пламенной струи через отверстие клапана, отчасти напоминающий выстрел некачественным патроном из стрелкового оружия. При этом сердечник, подпираемый давлением скопившихся газов, вырывает части защитного клапана и увлекает за собой обрывки обоих электродов, вместе с примерно третьей частью всех электродных масс. Прорыв клапана приводит к образованию пламенной струи горючих газов, частичному сгоранию фольги алюминиевого электрода и выбросу пылевидных электродных масс, содержащих (в случае использования элементов ICR) графит и оксиды лития, алюминия, кобальта.

Из каждого сгоревшего аккумуляторного элемента 18650 Samsung ICR 30A в момент образования искро-газовой струи спо-

собно выделяться в виде аэрозолей около 3,3 г оксида кобальта CoO , 0,7 г оксида лития Li_2O , 2,4 г углерода $\text{C}_{\text{тв}}$ и 1,5 г оксида алюминия Al_2O_3 .

В целом выгорание аккумуляторной батареи, составленной из элементов 18650 или им подобных, имеет выраженный порционный характер. Применительно к разработке положений модели горения можно отметить, что суммарная скорость выгорания батареи, составленной из подобных аккумуляторных элементов, будет также зависеть от скорости нагрева элементов, соседних с уже загоревшимся, что через некоторый интервал времени должно приводить к их воспламенению (выпуску очередных искро-газовых порций).

В данной работе были оценены средние величины коэффициентов выделения CO и CO_2 , потребления O_2 и удельной скорости выгорания литий-ионных аккумуляторных элементов 18650 Samsung ICR 30A. Показано, что величина удельной скорости выгорания по крайней мере на порядок превышает аналогичный показатель многих типовых горючих нагрузок, что объясняется спецификой горения — формированием скоростной горячей газовой струи при воспламенении элементов аккумуляторной батареи.

Следует ожидать, что токсичность продуктов горения литий-ионных аккумуляторных элементов будет более высокой в сравнении со многими распространенными углеродсодержащими горючими нагрузками, поскольку дополнительно на пожаре в помещении присутствует угроза вдыхания горячей пыли с высоким содержанием токсичных оксидов металлов, оказывающих влияние на слизистые и функцию легких.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д. И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34.
2. Основные положения о пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // О. В. Двоенко [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 34–47.
3. Орлов О. И., Комельков В. А., Сорокин Д. В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (48). С. 177–188.
4. Подробнее о «Оксид лития» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny32o> (дата обращения: 25.05.2025).
5. Токсичность лития. Техника безопасности при работе с литием // ПЗПС : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny3Fi> (дата обращения: 25.05.2025).
6. Подробнее о «диАлюминий триоксид» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://clck.ru/3Ny3Ws> (дата обращения: 25.05.2025).
7. Подробнее о «Кобальт оксид» // Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ / НИАЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора : сайт. URL: <https://rpohev.ru/online/detail.html?id=561> (дата обращения: 25.05.2025).
8. Контроль качества литий-ионных аккумуляторов / Д. В. Бессонов [и др.] // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1 (47). С. 68–74.
9. Изучение термической устойчивости Li-ионных батарей / Д. В. Бессонов [и др.] // Безопасность критичных инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур «Safety 2018» : сб. ст. / науч. ред. С. А. Тимашев. Екатеринбург, 2018. С. 102–104.

REFERENCES

1. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries / D. I. Terentyev et al. // Technosphere safety. 2024. № 3 (44). pp. 25–34.
2. Basic provisions on the fire hazard of lithium-ion batteries / O. V. Dvoenko et al. // Technosphere safety. 2024. № 4 (45). pp. 34–47.
3. Orlov O. I., Komelkov V. A., Sorokin D. V. Fire hazard of lithium-ion batteries // Modern problems of civil protection. 2023. № 4 (48). pp. 177–188.
4. Learn more about Lithium oxid // Federal Register of potentially dangerous chemical and biological substances / NIAC RPOKHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://clck.ru/3Ny32o> (date of application: 25.05.2025).
5. Lithium toxicity. Safety precautions when working with lithium. URL: <https://clck.ru/3Ny3Fi> (date of application: 25.05.2025).

6. Learn more about Dialuminium Trioxide // Federal Register of potentially dangerous chemical and biological substances / NIAC RPOKHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://clck.ru/3Ny3Ws> (date of application: 25.05.2025).

7. Learn more about Cobalt Oxide // Federal Register of potentially hazardous chemical and Biological Substances / NIAC RPOHBV FBUN «FNTSG named after F. F. Erisman» of Rospotrebnadzor. URL: <https://rpohv.ru/online/detail.html?id=561> (date of application: 25.05.2025).

8. Quality control of lithium-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Bulletin of the National Library of Railways. 2021. № 1 (47). pp. 68–74.

9. Study of the thermal stability of Li-ion batteries / D. V. Bessonov et al. // Safety of critical infrastructures and territories. Problems of safety of construction critical infrastructures «Safety 2018» : collection of articles Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg, 2018. pp. 102–104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Терентьев Дмитрий Иванович, канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИО УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Кокшаров Александр Викторович, канд. хим. наук, доцент, начальник кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 182341; Scopus Author ID: 16022538900; e-mail: koksharovav@uigps.ru

Сатюков Роман Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник УНК обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 793362; e-mail: satyukovrs@uigps.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy I. Terentiev, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor, Leading Researcher, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 47228; Scopus Author ID: 55900790600; ResearcherID: ADT-7503-2022; ORCID: 0000-0002-3991-4366; e-mail: terentyevdi@uigps.ru

Alexandr V. Koksharov, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 182341; Scopus Author ID: 16022538900; e-mail: koksharovav@uigps.ru

Roman S. Satukov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the educational and scientific complex, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062 Russian Federation); ID RISC: 793362; e-mail: satyukovrs@uigps.ru

Поступила в редакцию 30.05.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.849

О ПРИМЕНЕНИИ ТАКТИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ТОРГОВЫХ ЦЕНТРАХ

Крудышев Владимир Валерьевич, Опарин Иван Дмитриевич, Кузнецов Антон Александрович,
Дзигоев Артур Федяевич

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

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения тактической вентиляции в зданиях торговых центров современной архитектуры с фудкортами и кинотеатрами, с массовым пребыванием людей в дневное время. Проведен анализ пожаров в современных торговых центрах и литературный обзор применения тактической вентиляции при их тушении. Рассмотрены особенности применения тактической вентиляции, а также описаны назначение и характеристики средств для ее осуществления. Проведен анализ эффективности применения переносных дымососов в России. Изучена целесообразность применения дымососов и их эксплуатационные характеристики. С помощью программного обеспечения проведено моделирование распространения опасных факторов пожара при использовании средств дымоудаления, с визуализацией процесса эвакуации людей из помещений кинотеатра торгового центра на различных временных интервалах. В ходе моделирования на различных программных продуктах изучено влияние скорости дымоудаления на процесс эвакуации из помещений кинотеатра. С помощью сравнительного анализа выявлены наиболее подходящие образцы дымососов на электрическом приводе для использования в ходе тушения пожаров внутри помещений торговых центров. Сделаны выводы о важности и необходимости учета всех факторов, оказывающих воздействие на тактическое вентилирование.

Ключевые слова: тактическая вентиляция, дымосос, эвакуация, анализ характеристик, моделирование распространения, опасные факторы пожара

Для цитирования: О применении тактической вентиляции в торговых центрах / В. В. Крудышев [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 33–45.

ON THE USE OF TACTICAL VENTILATION IN SHOPPING MALLS

Vladimir V. Krudyshev, Ivan D. Oparin, Anton A. Kuznetsov, Artur F. Dzagoev

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

Abstract. The article considers the issues of using tactical ventilation in buildings of shopping malls of modern architecture with food courts and cinemas, with mass presence of people during the daytime. An analysis of fires in modern shopping malls and a literary review of the use of tactical ventilation in their extinguishing are conducted. The features of the use of tactical ventilation

are studied, as well as the purpose and characteristics of the means for its implementation are described. An analysis of the effectiveness of portable smoke pumps in Russia is carried out. The expediency of using smoke pumps and their operational characteristics are studied. The software was applied to simulate the spread of fire hazards when using smoke extraction equipment, with visualization of the process of evacuating people from the premises of the cinema of the shopping mall at various time intervals. During the simulation on various software products, the influence of the smoke extraction rate on the evacuation process from the cinema premises is studied. Using comparative analysis, the most suitable models of electric smoke pumps for use in extinguishing fires inside shopping malls are identified. Conclusions are made about the importance and necessity of taking into account all factors affecting tactical ventilation.

Keywords: tactical ventilation, smoke pump, evacuation, characteristics analysis, propagation modeling, fire hazards

For Citation: On the use of tactical ventilation in shopping malls / V. V. Krudyshev et al. // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 33–45.

Введение

В первой четверти XXI в. произошло большое количество пожаров в торговых центрах России, которые унесли много человеческих жизней. 25 декабря 2024 г. во Владикавказе случился пожар в ТРЦ «Алания Молл» из-за падения обломков дрона [1]. 25 марта 2018 г. произошел пожар в ТРК «Зимняя вишня» в Кемерово, унесший жизни шестидесяти человек [2]. Ведомственная статистика пожаров (МЧС России) за последние несколько лет позволяет говорить о негативной тенденции по количеству крупных пожаров в торговых центрах. Ключевыми факторами во всех случаях травмирования или гибели на таких пожарах являются затяжная эвакуация и воздействие опасных продуктов горения.

К опасным факторам пожара (далее — ОФП), также воздействующим на людей, относят: пламя и искры, тепловой поток, повышенную температуру окружающей

среды, повышенную концентрацию токсичных продуктов горения, пониженную концентрацию кислорода, снижение видимости в дыму. При этом отравление токсичными продуктами горения — наиболее частая причина гибели людей при пожарах в торговых центрах, а повышенная температура окружающей среды, пониженная концентрация кислорода и снижение видимости в дыму существенно затрудняют эвакуацию пострадавших и работу подразделений пожарной охраны. Таким образом, ограничение воздействия описываемых факторов пожара и насыщение помещения воздухом с достаточной концентрацией кислорода позволят существенно снизить число пострадавших, ускорить процесс эвакуации и повысить эффективность работы подразделений пожарной охраны. Следовательно, управление газообменом на пожаре, или тактическая вентиляция, является актуальной и практически значимой задачей.

Теоретические аспекты тактической вентиляции

Тактическое вентилирование — довольно специфическая область изучения, в данном направлении есть определенные наработки. Различные исследования и публикации посвящены анализу методов тактического вентилирования, его эффективности и применения в пожаротушении и спасательных операциях.

В ряде научных работ рассматриваются вопросы организации тактического вентилирования на различных объектах с применением мобильных технических средств [3–8].

В некоторых работах [9, 10] как проблемный звучит вопрос эффективного управления газообменом при пожаре в ограждениях, говорится о важности и необходимости учета всех факторов, оказывающих воздействие на процесс тактического вентилирования. К таким факторам авторы относят:

- разность температур наружного воздуха и воздуха в помещении: конвективные

потоки способствуют притоку холодного воздуха извне;

- разность давлений воздушного столба: продукты горения выходят из помещений и возникает ток свежего воздуха, обогащенного кислородом;
- воздействие ветра.

Также указаны условия, при которых не стоит применять данный метод:

- здание или сооружение полностью охвачено огнем;
- в зоне горения открыты все оконные и дверные проемы;
- соотношение размеров приточного и вытяжного проемов превышает соотношение 1:3.

При использовании приборов тактической вентиляции необходимо руководствоваться следующим принципом размещения дымососа от приточного проема здания, где происходит пожар: это расстояние должно приблизительно соответствовать длине диагонали приточного проема, как представлено на рис. 1.

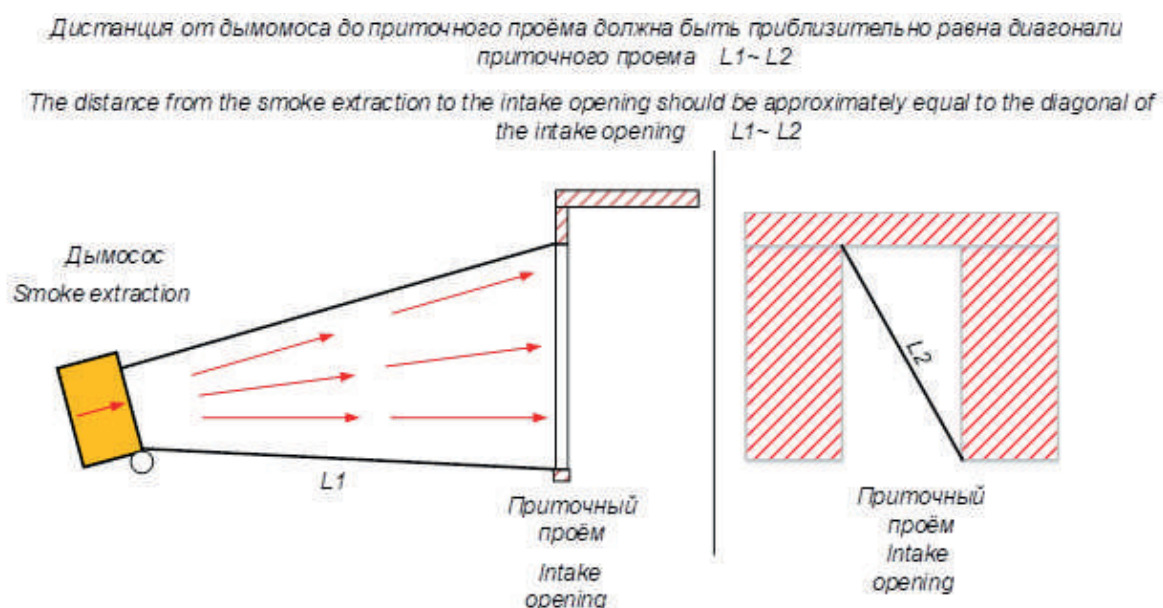


Рис. 1. Правильное расположение дымососа

Fig. 1. The correct location of the smoke pump

Стоит отметить, что использование тактической вентиляции приемлемо только на начальной стадии развития пожара: с момента возникновения пожара до полного охвата огнем поверхности горючей нагрузки.

В публикациях С. А. Шигорина [6] рассмотрена проблема эвакуации при пожарах на объектах с массовым пребыванием людей и в высотных зданиях. Рассмотрены средства эвакуации людей из зданий при сильном задымлении, показано применение тактического вентилирования при спасении людей. Рассмотрены возможности тактической вентиляции, представлены варианты освобождения задымляемых помещений от продуктов горения и возможности пожарно-спасательных подразделений оперативно провести спасательные работы по эвакуации людей. Авторы делают вывод о том, что успешное управление газообменом способствует улучшению условий для работы пожарных и спасателей.

В работе А. Д. Ищенко [7] рассмотрены проблемы обеспечения тушения пожаров на объектах энергетики и роль влияния опасных факторов пожара на ход тушения пожара. Важность своевременности тушения пожаров на объектах энергетики заключается в особом характере их производственного процесса, остановка которого может оказать влияние на жизнедеятельность значительной части населения. Обосновано, что наибольшее влияние на начало своевременного тушения пожара оказывает плотность задымления и снижение видимости вследствие наличия пожарной нагрузки в виде больших объемов турбинных масел и изоляционных материалов токоведущих частей. При этом стационарная система противодымной защиты не всегда эффективна,

поскольку обеспечивает возможность использования путей эвакуации, а не дымоудаления из производственных помещений. Предусматривать расширение системы на все помещения объектов энергетики не представляется целесообразным по экономическим и техническим причинам. Вследствие этого сделаны выводы о возможности применения мобильных средств дымоудаления для управления дымовыми и воздушными потоками, однако с рядом ограничений, исходя из конструктивных и планировочных особенностей описываемых объектов. Кроме того, указано, что мобильные средства дымоудаления могут быть использованы для обеспечения объемного пожаротушения, не предусматривающего вход человека в помещение. В целом подчеркивается необходимость комплексного решения проблемы обеспечения тушения пожаров на объектах энергетики в условиях задымления.

В работе В. Н. Козырева [10] рассмотрены вопросы применения переносных пожарных дымососов различных типов при тушении пожаров. Описаны достоинства и недостатки разных типов приводов. Указано, что переносные дымососы обладают меньшей мощностью по сравнению с вентиляторами автомобилей дымоудаления, однако, они могут быть установлены в труднодоступных для автомобилей местах внутри помещений и гораздо ближе к точкам, где вентиляция и дымоудаление будут наиболее эффективны.

В публикации В. Я. Гладченко [11] представлены результаты экспериментов по подаче распыленной воды с помощью мобильных пожарных дымососов, обоснованные данные по изменению температуры в помещении при подаче распыленной

воды дымососом, определены оптимальное расстояние подачи распыленной воды, ее массовый расход и оптимальный размер капель. Также установлено, что способ подачи распыленной воды с помощью мобильного пожарного дымососа, по сравнению с ручным пожарным стволом РСКУ-50А, позволяет снизить температуру в помещении за 3 мин на 450 °С, а расход огнетушащих веществ при этом в 6,8 раз меньше.

Группа авторов проводили изучение параметров работы дымососов, применяемых в производственной отрасли. Например, в работе Н. С. Босова [12] представлен анализ эффективности регулирования дымососов частотно-регулируемым приводом на котлоагрегате ТГМ-96. Автор сделал вывод, что регулирование производительности и полного давления дымососов экономичнее по сравнению с дроссельным видом регулирования. Однако покупка и установка частотно регулируемого привода требует более объемного анализа, основанного на сроке окупаемости, сроке службы, монтажа и обслуживания данного оборудования. Применение описываемого метода в пожарных дымососах может оказаться неактуальным, поскольку в деле тушения пожаров на первое место выходит оперативность действий и одной из важнейших характеристик систем дымоудаления является производительность.

Проведенный анализ научных работ позволяет говорить об актуальности и многогранности выбранного направления. Мобильные пожарные дымососы выполняют важную задачу в обеспечении безопасности людей в чрезвычайных ситуациях, поэтому более глубокий анализ их параметров и эффективности крайне необходим, однако работ в этом направлении на данный момент недостаточно. Это позволяет

утверждать, что проводимое исследование актуально и позволит внести определенный вклад в развитие данной области. Полученные результаты могут быть использованы как отправная точка для дальнейших исследований и улучшения эффективности работы пожарных дымососов с электроприводом. В целом данная тема имеет высокое научное и практическое значение и заслуживает дальнейшего изучения и развития.

Результаты и их обсуждение

Далее рассмотрим практическое применение тактической вентиляции на примере торгового центра, в котором произошел крупный пожар в конце 2024 г. (ТРЦ «Алания Молл»). Торгово-развлекательный центр представляет собой два здания прямоугольной формы, соединенных между собой переходом на 2-м этаже с кинотеатром «Алания Сinema» (рис. 2). Площадь — 7807,8 м²; размеры в плане — 136,5 × 57,2 м; высота — 18,0 м; 4 этажа; II степени огнестойкости. Количество людей, находящихся в дневное и ночное время, 500/200/5. Горючая нагрузка — 90 кг/м². Ширина проходов — 2,5 м. Основные горючие вещества — твердые вещества преимущественно органического происхождения (древесина, текстиль, бумага), плавящиеся твердые вещества, вещи повседневного обихода.

Служебные и технические помещения зданий не оборудованы приточной вентиляцией, вытяжка естественная через вентиляционные каналы в строительных конструкциях. Здание ТРЦ оборудовано системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Автоматических установок пожаротушения и систем дымоудаления и подпора воздуха на объекте нет.

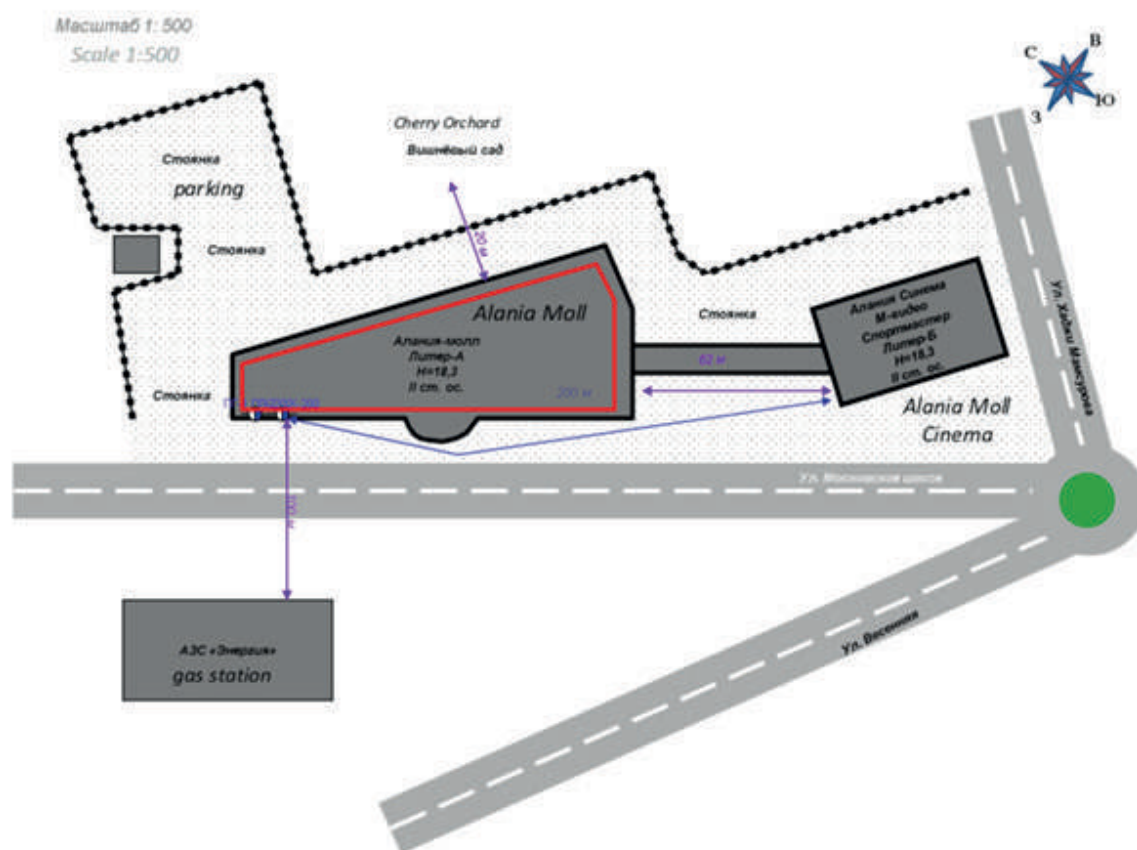


Рис. 2. План-схема ТРЦ «Алания Молл» на местности

Fig. 2. The layout of the shopping mall «Alanya Mall» on the ground

Далее рассмотрим моделирование эвакуации из помещений торгового центра на различных временных интервалах согласно Приложению 6 к методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности (далее — Методика), утвержденной приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140 [13]. Приложение описывает упрощенную аналитическую модель движения людского потока для определения расчетного времени эвакуации людей из помещений и зданий по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей.

В соответствии с п. 2 Приложения 5 Методики перед началом расчета процесса эвакуации в зависимости от назначения здания по таблице определяется основной эвакуируемый контингент и группы. Таким образом, минимальное расчетное количество людей в здании должно составлять не менее: для зданий кинотеатра — М0–5, суммарное количество М2, М3, М4 — 3 % от общей вместимости здания.

Было проведено моделирование процесса эвакуации людских потоков из помещения кинотеатра ТРЦ «Алания Молл» с последующей визуализацией на различных интервалах (на 0-, 100-, 200-, 300-, 400-, 500-, 560-й секундах). Примеры визуализации процесса эвакуации на 0-й и 300-й секундах представлены на рис. 3, 4.

Таблица
Расчетное количество людей в здании
Table
Estimated number of people in the building

Профиль Profile	Количество, чел. Number, people	Минимальное время эвакуации Minimum evacuation time, seconds	Максимальное время эвакуации Maximum evacuation time, seconds
M0-5	1 055	36,1	505,7
M2	11	185,8	521,4
M3	27	187,8	555,3
M4	7	529,9	559,9
Все профили All profiles	1 100	36,1	559,8

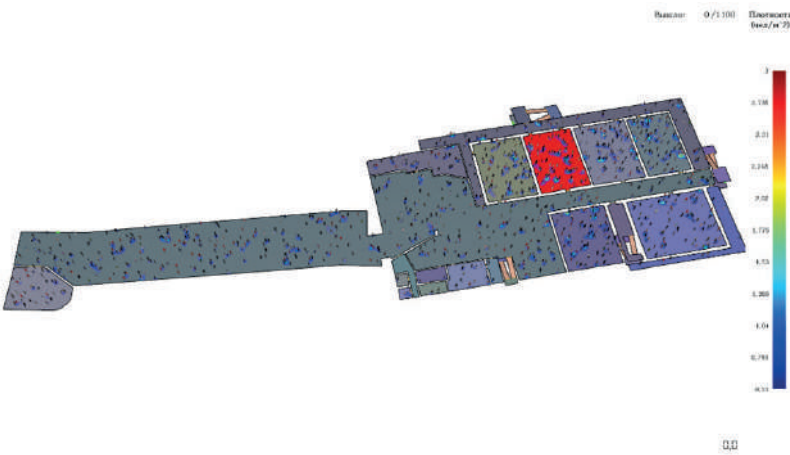


Рис. 3. Визуализация эвакуации людей из здания на 0-й секунде
Fig. 3. Visualization of evacuation of people from the building at 0 seconds

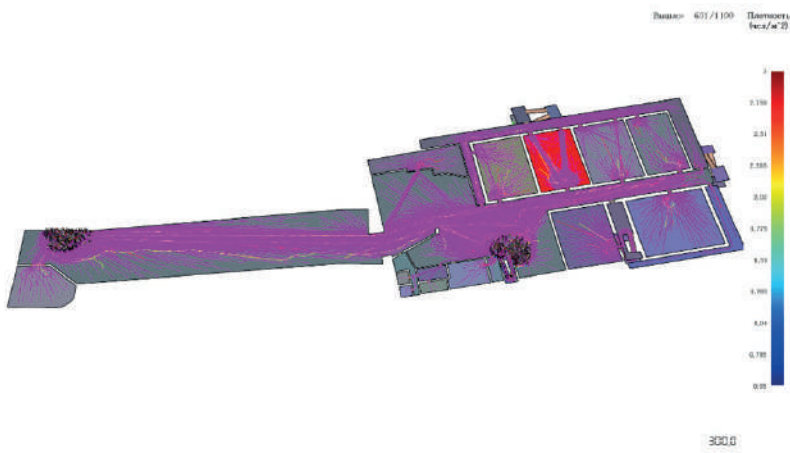


Рис. 4. Визуализация эвакуации людей из здания на 300-й секунде
Fig. 4. Visualization of evacuation of people from the building at 300 seconds

Расчетное время эвакуации людей t_p следует определять как сумму времени движения людского потока по отдельным участкам пути t_i по формуле [13]:

$$t_p = t_1 + t_2 + \dots + t_i, \quad (1)$$

где:

t_1 — время движения людского потока на первом (начальном) участке, мин;

$t_2, t_3, \dots, t_i$ — время движения людского потока на каждом из следующих участков после первого участка пути, мин.

Этажные и междуэтажные площадки в целях упрощения и облегчения вычислений, учитывая их небольшие размеры и меньшую сложность движения по ним в сравнении с лестничными маршами, можно отнести к наклонным путям. Не допуская серьезной погрешности, длину пути по двухмаршевой лестнице можно принимать равной его утроенной высоте.

Время движения людского потока по первому участку пути t_1 , мин, рассчитывают по формуле:

$$t_1 = \frac{l_1}{V_1}, \quad (2)$$

где:

l_1 — длина первого участка пути;

V_1 — скорость движения людского потока на начальном участке, м/мин (определяется в соответствии с Приложением 2 Методики, в зависимости от плотности D , $\text{м}^2/\text{м}^2$).

Плотность людского потока на начальном участке пути D_1 определяем по формуле:

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot \delta_1}, \quad (3)$$

где:

N_1 — число людей на начальном участке;

f — средняя площадь горизонтальной проекции человека;

l_1 — длина первого участка пути;

δ_1 — ширина начального участка пути.

В результате определили общее время эвакуации людей из кинотеатра ТРЦ «Алания Молл», которое составляет 559,8 с.

Далее рассмотрим моделирование распространения опасных факторов пожара. При моделировании пожара были построены 2D-сечения на высоте 1,7 м для наглядности распространения ОФП по повышенной температуре и потере видимости. На основании проведенного моделирования приходим к выводу, что первичным ОФП является потеря видимости через 58,82 с после начала пожара. Процесс распространения ОФП (потеря видимости и повышенная температура) без использования мобильного пожарного дымососа представлен на рис. 5, 6 (так же на 0-й и 300-й секундах).

Затем выполнили моделирование распространения ОФП с учетом установки на входе в помещение мобильного пожарного дымососа с электроприводом. Результат на тех же отрезках времени представлен на рис. 7, 8.

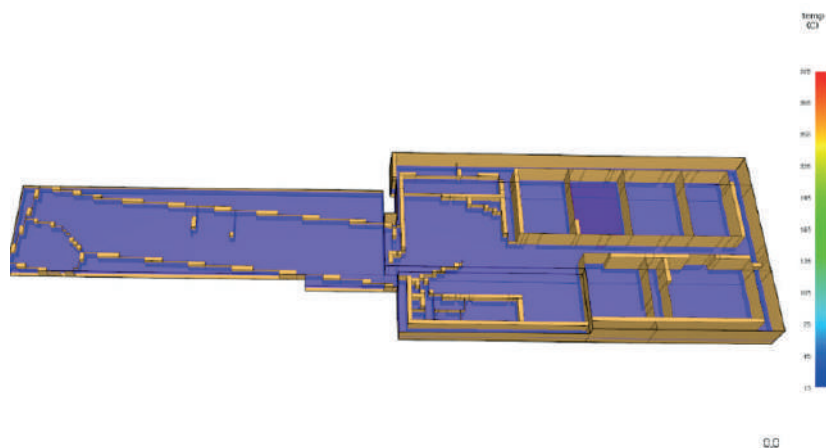


Рис. 5. Моделирование распространения ОФП без установки дымососа на 0-й секунде
Fig. 5. Simulation of the propagation of fire hazards without installing a smoke pump at 0 seconds

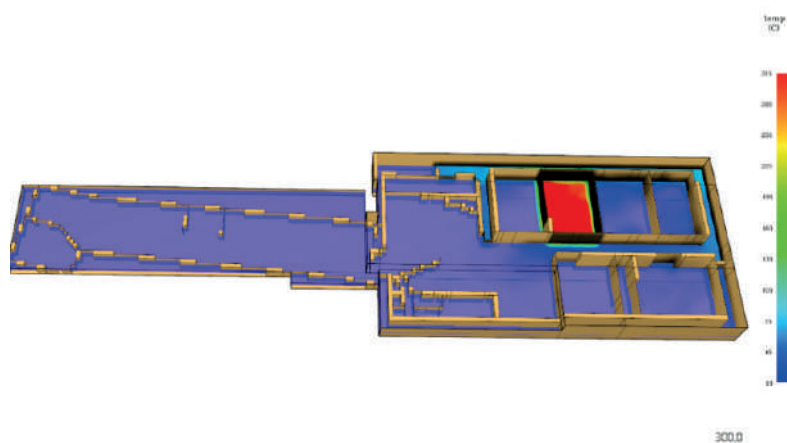


Рис. 6. Моделирование распространения ОФП без установки дымососа на 300-й секунде
Fig. 6. Simulation of the propagation of fire hazards without installing a smoke pump at 300 seconds

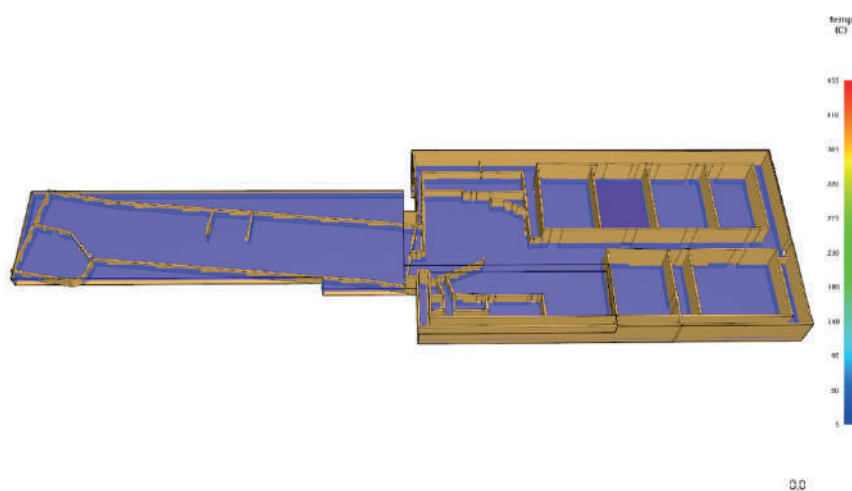


Рис. 7. Моделирование распространения ОФП с установкой дымососа на 0-й секунде
Fig. 7. Simulation of the propagation of fire hazards with installing a smoke pump at 0 seconds

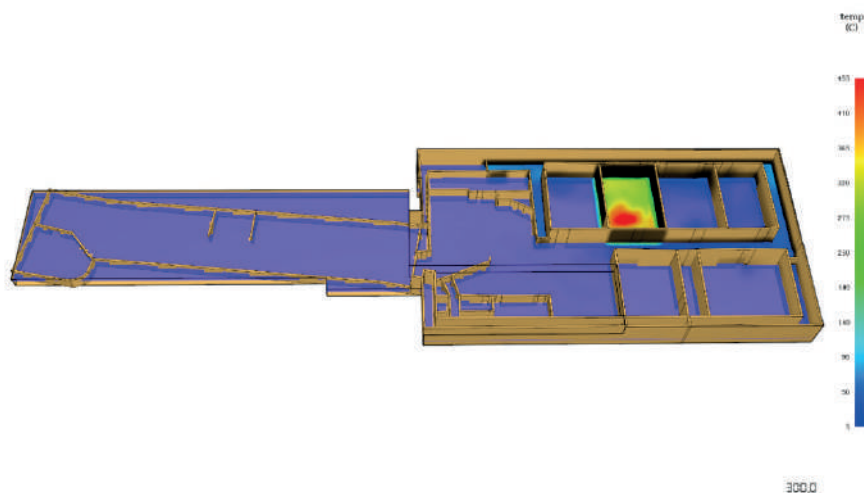


Рис. 8. Моделирование распространения ОФП с установкой дымососа на 300-й секунде
Fig. 8. Simulation of the propagation of fire hazards with installing a smoke pump at 300 seconds

Заключение

Современные программные продукты позволяют визуализировать и сравнивать различные сценарии эвакуации и распространения ОФП. Выполненное моделирование позволило продемонстрировать влияние использования дымососа на процесс распространения ОФП. Например, в первом случае (без использования средств дымоудаления) на 300-й секунде в холле кинотеатра наблюдается существенное снижение видимости в дыму. А при использовании дымососа на 300-й секунде оптическая плотность дыма значительно ниже, что позволяет эффективно производить эвакуацию

людей из кинотеатра и дает возможность подразделениям пожарной охраны беспрепятственно выполнять боевые задачи по тушению пожара.

Следует отметить, что на эффективность дымоудаления будут влиять характеристики дымососа: чем выше производительность, тем быстрее будет осуществляться дымоудаление. Однако и масса такого дымососа будет выше, что скажется на его мобильности и времени установки.

В дальнейших исследованиях планируется выполнить сравнительный анализ существующих моделей пожарных мобильных дымососов с учетом комплекса их технических характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Взрыв и пожар в ТЦ во Владикавказе произошел из-за обломков дрона // РБК : сайт. URL: <https://clck.ru/3NwtrK> (дата обращения: 18.02.2025). Дата публикации: 25.12.2024.
2. Федотова Д., Боброва И. Все о пожаре в ТЦ Кемерово: версии, рассказы очевидцев // МК.RU : сайт. URL: <https://clck.ru/3NwuC6> (дата обращения: 18.02.2025). Дата публикации: 25.03.2018.

3. Особенности применения метода тактического вентилирования при тушении пожаров / А. А. Карапузиков [и др.] // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения : сб. ст. III Всероссийской научно-практической конференции / под науч. ред. А. В. Чупшева [и др.]. 2023. С. 93–95. URL: <https://clck.ru/3NwvfC> (дата обращения: 18.01.2025).

4. Применение метода тактического вентилирования при управлении газообменом на пожаре в зданиях / А. А. Карапузиков [и др.] // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения : сб. ст. III Всероссийской научно-практической конференции / под науч. ред. А. В. Чупшева [и др.]. 2023. С. 89–92. URL: <https://clck.ru/3NwxCM> (дата обращения: 18.01.2025).

5. Карапузиков А. А., Горелик А. С., Дьяков М. В. Современные способы применения тактического вентилирования при пожарах в ограждениях // Техносферная безопасность. 2022. № 1 (34). С. 66–72. URL: <https://clck.ru/3NxUiE> (дата обращения: 20.01.2025).

6. Шигорин С. А., Половинкин В. С. Защита людей при пожарах в высотных зданиях путем применения мобильных средств вентилирования // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : мат. VII Международной научно-практической конференции / Академия ГПС МЧС России. 2020. Ч. 2. С. 144–147. URL: <https://clck.ru/3NwxFx> (дата обращения: 20.01.2025).

7. Ищенко А. Д. Проблемы обеспечения тушения пожаров на объектах энергетики оперативными подразделениями пожарной охраны // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 5. С. 26–36.

8. Опарин Д. Е., Крудышев В. В., Опарин И. Д. Вопросы применения тактического вентилирования на объектах // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций : сб. ст. XI Международной научно-практической конференции / Пензенский государственный аграрный университет. 2023. С. 325–328. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56168527> (дата обращения: 20.01.2025).

9. Методические рекомендации руководителю тушения пожара по организации и проведению тактической вентиляции зданий и сооружений при тушении пожаров и ликвидации последствий ЧС на территории города Москвы. М., 2014. 78 с.

10. Козырев В. Н., Ртищев С. М., Илеменов М. В. Применение переносных пожарных дымососов пожарными подразделениями на пожарах // Пожарная и аварийная безопасность : сб. мат. XIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности / Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2018. Ч. 1. С. 382–385.

11. Гладченко В. Я., Максимкин В. А., Ольховский И. А. Способ снижения температуры в обособленных помещениях при помощи переносных пожарных дымососов // Системы безопасности : мат. международной научно-технической конференции. 2023. № 32. С. 283–287.

12. Босов Н. С. Анализ эффективности регулирования дымососов частотно-регулируемым приводом на котлоагрегате ТГМ-96 // Научный потенциал XXI века : мат. Международной (заочной) научно-практической конференции. Нур-Султан, 2019. С. 29–33.

13. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140 ; зарег. в Минюсте России 20.03.2023 № 72633 //

КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.ru/3Nwz58> (дата обращения: 20.01.2025).

REFERENCES

1. An explosion and fire at a shopping center in Vladikavkaz were caused by a drone wreckage // RBC. URL: <https://clck.ru/3NwtrK> (date of application: 18.02.2025). Date of publication: 25.12.2024.
2. Fedotova D., Bobrova I. Everything about the fire at the Kemerovo shopping center: versions and eyewitness accounts // MK.RU. URL: <https://clck.ru/3NwuC6> (date of application: 18.02.2025). Date of publication: 25.03.2018.
3. Features of the application of the tactical ventilation method in extinguishing fires / A. A. Karapuzikov et al. // Current issues of fire safety of various facilities : collection of articles. Penza, 2023. pp. 93–95. URL: <https://clck.ru/3NwvfC> (date of application: 18.01.2025).
4. Application of the tactical ventilation method in controlling gas exchange in case of fire in buildings / A. A. Karapuzikov et al. // Actual issues of fire safety of various facilities : collection of articles. Penza, 2023. pp. 89–92. URL: <https://clck.ru/3NwxCM> (date of application: 18.01.2025).
5. Karapuzikov A. A., Gorelik A. S., Dyakov M. V. Modern methods of applying tactical ventilation in case of fires in fences // Technosphere safety. 2022. № 1 (34). pp. 66–72. URL: <https://clck.ru/3NxUiE> (date of application: 20.01.2025).
6. Shigorin S. A., Polovinkin V. S. Protection of people in case of fires in high-rise buildings through the use of mobile ventilation systems // Firefighting: problems, technologies, innovations : proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. 2020. Part 2. pp. 144–147. URL: <https://clck.ru/3NwxFx> (date of application: 20.01.2025).
7. Ishchenko A. D. Problems of ensuring fire extinguishing at energy facilities by operational fire protection units // Fire and explosion safety. 2016. Vol. 25, № 5. pp. 26–36.
8. Oparin D. E., Krudyshev V. V., Oparin, I. D. Issues of the application of tactical ventilation at facilities // Strategic development of the innovative potential of industries, complexes and organizations : collection of articles. Penza, 2023. pp. 325–328. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56168527> (date of application: 20.01.2025).
9. Methodological recommendations to the fire extinguishing manager on the organization and conduct of tactical ventilation of buildings and structures during fire extinguishing and emergency response in Moscow. M., 2014. 78 p.
10. Kozyrev V. N., Rtischev S. M., Ilemenov M. V. The use of portable fire smoke pumps by fire departments in fires // Fire and emergency safety : collection of materials of the XIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Safety Culture, Ivanovo. 2018. Part 1. pp. 382–385.
11. Gladchenko V. Ya., Maksimkin V. A., Olkhovsky I. A. A method of reducing temperature in isolated rooms using portable fire smoke pumps // Safety Systems : proceedings of the international scientific and technical conference. 2023. № 32. pp. 283–287.
12. Bosov N. S. Analysis of the effectiveness of regulating smoke pumps with a frequency-controlled drive on the TGM-96 boiler unit // Scientific potential of the XXI century : proceedings of the International (correspondence) scientific and practical conference. Nur-Sultan, 2019. pp. 29–33.

13. On Approval of the Methodology for Determining Calculated Fire Risk values in Buildings, structures and Fire compartments of various functional fire hazard classes : order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 14.11.2022 № 140 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.ru/3Nwz58> (date of application: 20.01.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крудышев Владимир Валерьевич, канд. с.-х. наук, доцент, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 811498; e-mail: krudishev@gmail.com

Опарин Иван Дмитриевич, канд. экон. наук, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 793882; e-mail: oparinivan@mail.ru

Кузнецов Антон Александрович, канд. психол. наук, доцент кафедры пожарно-прикладной подготовки Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 850940; e-mail: kuznetzoff.aa@yandex.ru

Дзигоев Артур Федяевич, магистрант Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: dzigoev221284@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Krudyshev, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Head of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Special Technical Means, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 811498; e-mail: krudishev@gmail.com

Ivan D. Oparin, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Special technical Means, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 793882; e-mail: oparinivan@mail.ru

Anton A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Psychol.), Associate Professor of the Department of Fire-Applied Training, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 850940; e-mail: kuznetzoff.aa@yandex.ru

Artur F. Dzagoev, master's student, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: dzigoev221284@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2025
Одобрена после рецензирования 15.02.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.844.2+614.842.612

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АМФИФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЖАРОТУШАЩЕГО ВОДЯНОГО ТУМАНА

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

Аннотация. В последние десятилетия технологии объемного тушения с использованием водяного тумана активно развиваются. Это обусловлено как прогрессом в разработке методов создания высококонцентрированных высокодисперсных водяных туманов (ВВТ), так и очевидными преимуществами применения ВВТ в качестве средства объемного пожаротушения. Повышение устойчивости ВВТ путем образования монослоя на поверхности капель при добавлении в распыляемую воду небольших количеств амфифильных соединений, таких как высшие жирные насыщенные спирты и их производные (ВЖС), является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена нахождению аналитического выражения для определения оптимальной концентрации ВЖС в распыляемой водной эмульсии, которая обеспечивает образование монослоя на каплях и повышает стабильность получаемого ВВТ.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, устойчивость тумана, объемное пожаротушение, амфифильные соединения, концентрация водной эмульсии, монослой

Для цитирования: Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Определение оптимальной концентрации амфифильных соединений в воде для повышения устойчивости пожаротушающего водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 46–56.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONCENTRATION OF AMPHIPHILIC COMPOUNDS IN WATER TO INCREASE THE STABILITY OF FIRE-EXTINGUISHING WATER MIST

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

Abstract. In recent decades, volumetric extinguishing technologies using water mist have been actively developing. This is due to both progress in the development of methods for creating highly concentrated, highly dispersed water mists (HWM) and the obvious advantages of using HWM as a means of volumetric fire extinguishing. Increasing the stability of HWM by forming a monolayer on the droplet surface when adding small amounts of amphiphilic compounds, such as higher fatty saturated alcohols and their derivatives (HFA), to the atomized water is an urgent

task. This work is devoted to finding an analytical expression for determining the optimal concentration of HFA in sprayable water emulsion, which ensures the formation of a monolayer on the droplets and the maximum stability of the obtained HWM.

Keywords: highly dispersed water mist, mist stability, volumetric fire extinguishing, amphiphilic compounds, water emulsion concentration, monolayer

For Citation: Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Determination of the optimal concentration of amphiphilic compounds in water to increase the stability of fire-extinguishing water mist // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 45–57.

Введение

За последние годы объемное тушение водяным туманом получило широкое распространение. Это связано как с развитием технологий создания высококонцентрированного высокодисперсного водяного тумана (далее — ВВТ), так и с несомненными преимуществами его применения в качестве пожаротушащего агента при объемном пожаротушении [1–5].

Вода продолжает оставаться самым доступным и экологичным огнетушащим веществом. При использовании ВВТ задействуются все основные механизмы прекращения горения. ВВТ демонстрирует газообразное поведение и позволяет эффективно тушить «скрытые», в т. ч. и тлеющие, очаги горения; при этом минимизируется возможный ущерб от воздействия воды. Применение ВВТ исключает необходимость эвакуации до начала работы системы пожаротушения.

Минимальная концентрация ВВТ в объеме помещения, при которой достигается тушение, может составлять от 100 г/м³ [1], это наименьшая величина среди известных огнетушащих веществ. Так, например, минимальная пожаротушащая концентрация фреонов — 430 г/м³.

Среди существующих и разрабатываемых технологий объемного тушения с помощью

водяного тумана можно выделить три основных направления, различающихся как способами технической реализации, так и дисперсностью получаемого ВВТ.

Системы тушения высокого давления используют однофазное распыление воды через специальные форсунки при давлении от 7 МПа. Давление, чаще всего, создается жидкостными насосами высокого давления. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~10 до ~60 мкм [5].

Гибридные системы пожаротушения используют двухфазное распыление, при котором высокоскоростным потоком инертного газа (преимущественно азота) диспергируется вода с образованием ВВТ. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~5 до ~40 мкм [3, 4].

Ультразвуковое распыление воды для целей объемного пожаротушения осуществляется с помощью ультразвуковых колебаний, которые воздействуют на слой воды с частотой до 3 МГц [1, 2]. Генерируемый ВВТ характеризуется наиболее высокой дисперсностью и однородностью в распределении капель по размеру среди перечисленных технологий диспергирования воды. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~1 до ~20 мкм.

Создание и поддержание высоких концентраций ВВТ, необходимых для эффективного применения объемных методов пожа-

ротушения, сопряжено со значительными трудностями. Например, при увеличении концентрации тумана скорость его разрушения также быстро возрастает [1, 6]. Для того чтобы полностью ликвидировать горение, особенно тлеющее, необходимо поддерживать концентрацию тумана на уровне, превышающем огнетушащую концентрацию в течение довольно длительного времени [1].

Стабильность и противоположенное явление — разрушение ВВТ зависят от взаимодействия множества процессов, включая испарение, конденсацию, коагуляцию, коалесценцию и седиментацию в дисперсной фазе. Применительно к объемному пожаротушению увеличение устойчивости плотного (высококонцентрированного) тумана свидетельствует о замедлении этих процессов при относительной влажности окружающего воздуха — 100 %.

Объемное пожаротушение высокодисперсным водяным туманом демонстрирует значительные преимущества в условиях, требующих защиты от огня с минимизацией вторичного ущерба. Технологии, направленные на повышение дисперсности, концентрации и устойчивости тумана, играют ключевую роль в успешном развитии и применении данных систем.

Процессы испарения, конденсации и коалесценции влияют на устойчивость водяного тумана, и повышение этой устойчивости возможно через замедление указанных процессов, протекающих при 100%-й относительной влажности.

Конденсированные пленки, иначе называемые монослоями, которые образуются на поверхности воды, снижают скорость испарения во много раз или даже на несколько порядков. Монослои определяются как поверхностные пленки толщиной эквивалент-

ной одной молекуле, которые покрывают всю поверхность воды. Монослои образуются органическими амфифильными молекулами, такими как высшие жирные насыщенные спирты и их производные (далее — ВЖС) [7, 8].

Органические амфифильные соединения состоят из двух разнородных частей. Одна часть гидрофильна и полярна, часто называется «головкой». Остальная часть молекулы гидрофобна и состоит из длинной насыщенной алкановой цепи, обычно называемой «хвост». В случае если хвост проявляет выраженные гидрофобные свойства, соединение становится нерастворимым. При достаточной концентрации амфифильные молекулы на поверхности воды формируют сплошной мономолекулярный слой, в котором они ориентируются перпендикулярно поверхности воды. Этот слой действует как полупроницаемый барьер вокруг капли и снижает как скорость ее испарения, так и, согласно принципу микроскопической обратимости, скорость конденсации паров из окружающей атмосферы [9].

На рис. 1 приведено схематическое изображение монослоя ВЖС на поверхности капли воды. Гидрофильные головки молекул ВЖС находятся в поверхностном слое капли, углеводородные хвосты молекул развернуты наружу и перпендикулярны поверхности воды.

Одновременное протекание испарения и конденсации воды в ВВТ называется переконденсацией — процесс испарения мелких капель, приводящий к последующей конденсации паров на более крупных каплях при относительной влажности окружающего воздуха 100 %. Это явление объясняется тем, что мелкие капли обладают большей кривизной поверхности по сравнению с крупными каплями, следовательно, давление насыщенного пара над мелкими каплями больше, чем над крупными.

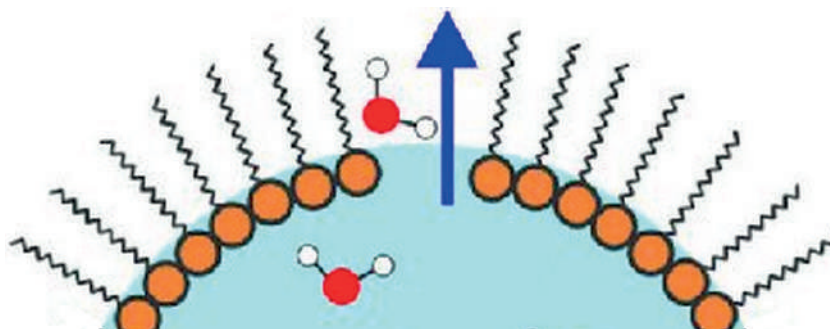


Рис. 1. Схематическое изображение монослоя ВЖС на поверхности капли воды

Fig. 1. Schematic illustration of a monolayer of HFA on the surface of a water droplet

Эти явления приводят к быстрому уменьшению мелких и увеличению крупных капель, особенно в плотном тумане. Увеличение размера крупных капель приводит к значительному повышению интенсивности других процессов, включая седиментацию, коагуляцию и коалесценцию, которые в конечном итоге способствуют разрушению ВВТ.

Следует указать, что монослой может выступать и как механическое препятствие, затрудняющее слияние капель и их захват ограждающими конструкциями. Это объясняется тем обстоятельством, что между однородными хвостами амфифильных молекул действуют взаимные силы отталкивания.

Процессы переконденсации и коалесценции тем интенсивней, чем ближе капли находятся друг к другу [10]. Таким образом, формирование монослоя на каплях ВВТ может радикально повысить устойчивость высококонцентрированного водного тумана, что особенно значимо для целей объемного пожаротушения.

Предыдущими исследованиями установлено, что увеличение длины углеродной цепи или хвоста ВЖС с $n = 12$ до $n = 18$ снижает коэффициент испарения воды, покрытой монослоем ВЖС в ~ 300 раз [9].

Все амфифильные соединения, образующие на поверхности воды монослой и обеспечивающие наиболее значительное уменьшение коэффициента испарения воды, при нормальных условиях являются твердыми и нерастворимыми в воде веществами. Для формирования монослоя на каплях ВВТ необходимо обеспечить равномерное распределение ВЖС по всему объему распыляемой воды. Это достигается путем эмульгирования ВЖС в водной среде, что является в настоящее время единственным доступным методом распределения ВЖС в воде применительно к целям объемного пожаротушения.

Стабильность получаемых, в т. ч. с применением эмульгаторов, водных эмульсий ВЖС подтверждена экспериментальными исследованиями [7, 11, 12].

В нашей предыдущей работе приведены результаты определения оптической плотности ВВТ в зависимости от времени [7]. При возрастании концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии и продолжительности поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере, стабильность ВВТ повышается благодаря формированию мономолекулярного слоя на поверхности капель. Максимальное повышение устойчивости по сравнению с водой составило 2,3 раза. Дальнейшее повышение устойчи-

ности ВВТ возможно с повышением концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии [7].

Нами не было найдено сведений о других работах, направленных на повышение стабильности высококонцентрированных водяных туманов в макрообъемах, применимых для объемного пожаротушения с помощью монослоев ВЖС. Также ранее не проводилось определение необходимой концентрации ВЖС в эмульсии для различных способов ее распыления.

Результаты и их обсуждение

Обозначения и исходные данные:

s — площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС на поверхности воды, м^2 ;

d_0 — начальные диаметры капель воды в ВВТ после распыления, м ;

d_k — диаметры капель воды в ВВТ после испарения и образования монослоя, м ;

C_m — молярная концентрация ВЖС в воде, $\text{ммоль (моль/м}^3\text{)}$;

N — количество молекул ВЖС в капле ВВТ;

A_B — число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$);

n — длина углеродной цепи ВЖС.

Обозначим граничные условия и основные параметры для определения необходимой и достаточной концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии.

Как известно из предыдущих исследований, при диспергировании эмульсии с концентрацией, недостаточной для фор-

мирования монослоя, все молекулы ВЖС концентрируются на поверхности образующихся капель. При испарении и уменьшении размера капли, на ее поверхности образуется полностью насыщенный мономолекулярный слой ВЖС (см. рис. 1), при этом скорости испарения и конденсации воды резко уменьшаются [9].

При плотной упаковке молекул ВЖС на поверхности воды площадь, занимаемая каждой молекулой (s), должна быть примерно постоянной, т. к. гидрофильные функциональные группы молекул ВЖС одинаковы или имеют сходное строение.

В работах [8, 9, 13] приводятся экспериментальные данные по начальным диаметрам исследуемых капель воды (d_0) и молярным концентрациям в них ВЖС (C_m). Конечные диаметры после испарения части воды из капель (d_k) соответствуют моменту, когда происходит образование монослоя, о чем свидетельствует резкое уменьшение коэффициента испарения воды.

Из вышеприведенного следует, что количество молекул ВЖС (N), находящихся в исходной (до начала ее испарения) капле с диаметром (d_0) (1), должно быть равно количеству молекул, образующих монослой, (N) при диаметре капли (d_k) (2). Нижеприведенные формулы выражают это равенство, где A_B — число Авогадро.

После приравнивания и преобразования формул (1) и (2) получаем формулу (3).

$$N = \frac{\pi d_0^3 A_B C_m}{6} \quad (1)$$

$$N = \frac{\pi d_k^2}{s} \quad (2)$$

$$\frac{d_k^2}{d_0^3} = \frac{A_B s C_m}{6} \quad (3)$$

Из (3) следует, что отношение d_k^2/d_0^3 прямо пропорционально молярной концентрации (C_m) и площади, занимаемой каждой молекулой ВЖС в монослое, (s).

На основании экспериментальных данных, приведенных в [8, 9, 13], постро-

им зависимость отношения d_k^2/d_0^3 от молярной концентрации ВЖС (C_m).

На рис. 2 приведена эта зависимость для предельных высших жирных спиртов с длиной углеродной цепи от $n = 13$ до $n = 18$.

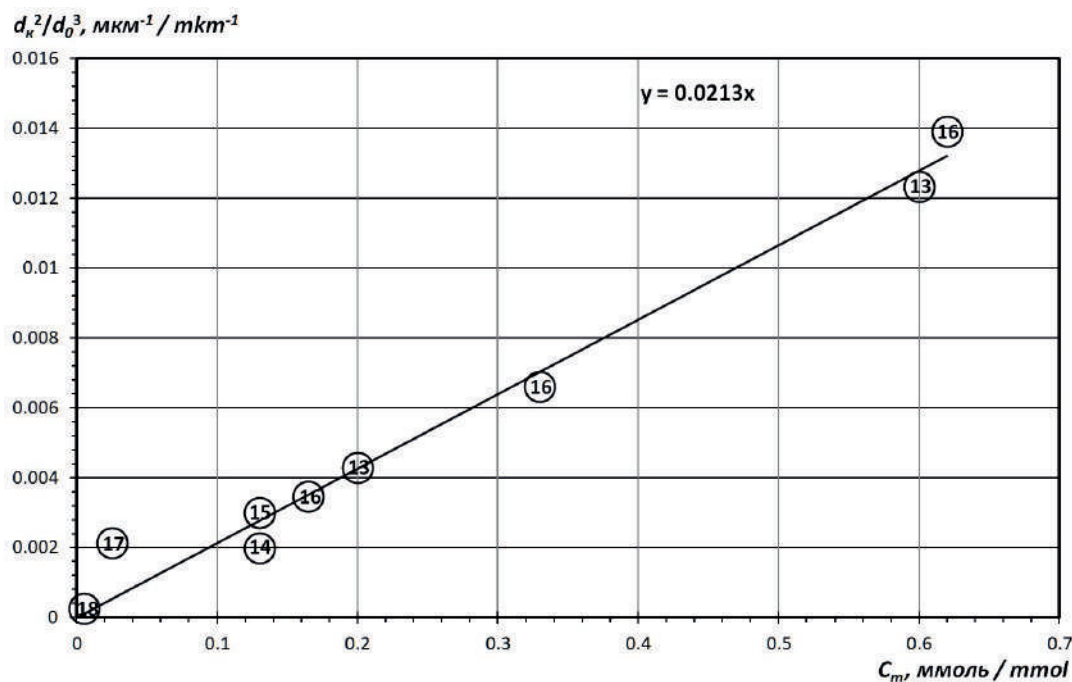


Рис. 2. Зависимость отношения d_k^2/d_0^3 от молярной концентрации ВЖС (C_m). Внутри маркеров, обозначающих экспериментальные значения, указана длина углеродной цепи конкретного ВЖС (n)

Fig. 2. Dependence of the ratio d_k^2/d_0^3 on the molar concentration of HFA (C_m). The length of the carbon chain of a specific alcohol is indicated inside the markers denoting experimental values (n)

Из данных рис. 2 следует, что все экспериментальные точки графика лежат вблизи одной прямой. Это обстоятельство подтверждает приведенные ранее выводы о нахождении всех молекул ВЖС на поверхности капель и о постоянстве площади молекул ВЖС в монослое. Некоторое несовпадение с прямой линией может быть обусловлено как погрешностью эксперимента, так и незначительной зависи-

мостью площади, занимаемой молекулой ВЖС в монослое, от температуры и длины цепи [14].

Из угла наклона прямой аппроксимирующей экспериментальные данные на рис. 2 и с учетом значения числа Авогадро (A_v) площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС в монослое (s), может быть вычислена по формуле (4), которая получена после преобразования формулы (3).

$$s = \frac{6 \cdot 0,0213 \cdot 10^6}{A_v} = 21,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2. \quad (4)$$

Полученное значение для площади молекулы ВЖС в монослое $s = 21,2 \text{ Å}^2$ согласуется с другими литературными данными [9, 13, 14].

С увеличением концентрации ВЖС диаметр капли d_k , до которого при испарении и до момента образования монослоя уменьшается исходная капля диаметром d_0 ,

закономерно увеличивается. С учетом формулы (3) зависимость d_k от C_m для различных значений d_0 выражается формулой (5).

Имеется много репрезентативных диаметров капель, которые можно использовать для

характеристики различных способов распыления. Диаметр капли в спектре распыления, при котором 10 % объема жидкости, содержащейся в ВВТ, приходится на капли меньшего диаметра, обычно обозначается — $D_{v0.1}$.

$$d_k = \sqrt{\frac{A_B s C_m d_0^3}{6}}. \quad (5)$$

Способы распыления воды для объемного пожаротушения характеризуются как различной степенью дисперсности, так и распределением капель по размерам. Выберем три значения диаметров капель d_0 , которые примерно соответствуют $D_{v0.1}$ для указанных ранее способов распыления — 10, 5 и 3 мкм. Условием необходимой и достаточной кон-

центрации ВЖС в распыляемой эмульсии является равенство $d_k = d_0$, оно обозначает, что в начальной капле диаметром d_0 уже достаточно ВЖС для образования монослоя.

С помощью формулы (5) и определенной ранее площади молекулы в монослое (s) построим графики зависимостей d_k от C_m для выбранных значений d_0 (рис. 3).

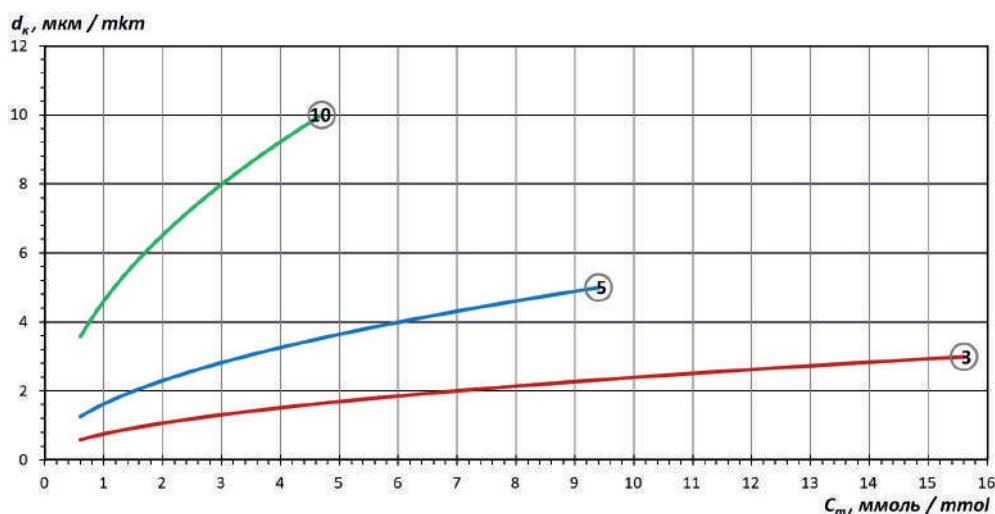


Рис. 3. Графики зависимостей d_k от C_m для выбранных значений d_0 . Маркеры обозначают значения d_k и C_m , при которых $d_k = d_0$

Fig. 3. Graphs of dependences of d_k on C_m for selected values of d_0 . Markers denote the values of d_k and C_m , at which $d_k = d_0$

С учетом равенства $d_k = d_0$ и формулы (3) выражение, определяющее необходимую и достаточную молярную концентрацию ВЖС (C_m), можно записать в виде (6).

В данном случае d_0 обозначает характеристичный диаметр, выбранный из начального участка известного спектра распределения капель по размерам в ВВТ.

$$C_m = \frac{6}{A_B s d_0}. \quad (6)$$

Полученная формула (6) обеспечивает простой расчет необходимой и достаточной для достижения высокой устойчивости ВВТ молярной концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии при выбранном значении d_0 и определенной ранее площади молекулы в монослое (s). Другие способы выражения концентрации могут быть получены из указанной формулы при учете молекулярной массы ВЖС.

В работе [7] установлено, что ультразвуковое распыление эмульсии с молярной концентрацией ВЖС свыше ~ 1 ммоль трудноосуществимо для ультразвуковых колебаний с частотой более 1 МГц. Это обстоятельство объясняется повышением вязкости эмульсии с увеличением ее концентрации. Обойти это ограничение возможно путем нагрева распыляемой эмульсии [7] и/или применением методов ультразвукового распыления на более низких частотах [15]. Для других приведенных выше способов получения ВВТ увеличение вязкости эмульсии незначительно сказывается на процессе распыления.

Выводы

Из проведенного анализа технологий диспергирования воды для целей объемного пожаротушения сделан вывод об ак-

туальности проведения исследований, направленных на определение оптимальных концентраций амфифильных соединений в распыляемой эмульсии для достижения максимальной устойчивости ВВТ.

На основе анализа и обобщения литературных данных по влиянию концентрации ВЖС на размеры капель воды, при которых уже образуется монослой на поверхности капли, была определена площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС в монослое. С увеличением концентрации ВЖС диаметр капли, до которого при испарении и до момента образования монослоя должна уменьшиться исходная капля, закономерно увеличивается.

Построенная зависимость отношения диаметров капель воды в присутствии монослоя от концентрации ВЖС подтвердила опубликованные ранее выводы о нахождении всех молекул ВЖС на поверхности капель и о постоянстве площади молекул ВЖС в монослое. Эта площадь примерно одинакова для всех рассматриваемых амфифильных соединений.

В результате исследования получено аналитическое выражение, которое обеспечивает простой расчет необходимой и достаточной для достижения высокой устойчивости ВВТ концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.

3. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Сверхзвуковое распыление воды для объемного пожаротушения // Техносферная безопасность. 2023. № 2 (39). С. 58–71.
4. Механизм тушения пламени газовойдыными составами ультрадисперсного распыла / С. Н. Копылов [и др.] // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 67–71.
5. Husted B. Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling in CFD : Doctoral Thesis. Lund, 2007. 125 p.
6. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
7. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Экспериментальное исследование повышения устойчивости высокодисперсного водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 78–89.
8. 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.
9. 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.
10. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 12. С. 16–22.
11. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // Nature. 1958. Vol. 182. p. 1724.
12. Effects of Emulsifier on Monolayer Structure and Evaporation Resistance / L. Lei et al. // Journal of the Chemical Society of Pakistan. 2014. Vol. 36. pp. 68–72.
13. Tuckermann R., Bauerecker S., Cammenga H. The generation of octadecanol monolayers on acoustically levitated water drops // Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007. Vol. 309. pp. 198–201.
14. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers / V. M. Kaganer et al. // Reviews of Modern Physics. 1999. Vol. 71. pp. 779–819.
15. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Шалунова А. В. Ультразвуковое распыление жидкостей. Барнаул, 2010. 272 с.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Supersonic water atomisation for volumetric fire extinguishing // Technospheric safety. 2023. № 2 (39). pp. 58–71.
4. The mechanism of extinguishing the flame with gas-water compositions of ultrafine spray / S. N. Kopylov et al. // Fire safety. 2014. № 2. pp. 67–71.
5. Husted B. Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling in CFD : Doctoral Thesis. Lund, 2007. 125 p.

6. Malgin Yu. V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier // S.O.K. 2020. № 3. pp. 56–59.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the specific features of the movement of droplets of atomised extinguishing liquid at the entrance to the flame zone // Pozharovzryvozryvobezopasnost. 2013. Vol. 22, № 12. pp. 16–22.
11. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // Nature. 1958. Vol. 182. p. 1724.
12. Effects of Emulsifier on Monolayer Structure and Evaporation Resistance / L. Lei et al. // Journal of the Chemical Society of Pakistan. 2014. Vol. 36. pp. 68–72.
13. Tuckermann R., Bauerecker S., Cammenga H. The generation of octadecanol monolayers on acoustically levitated water drops // Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007. Vol. 309. pp. 198–201.
14. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers / V. M. Kaganer et al. // Reviews of Modern Physics. 1999. Vol. 71. pp. 779–819.
15. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Ultrasonic atomization of liquids. Barnaul, 2010. 272 p.

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, доцент, заместитель начальника Уральского института ГПС МЧС России по научной работе (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459

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

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Georgy B. Pakhomov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Research Department, 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 the Institute for Scientific Work, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459

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

Поступила в редакцию 14.04.2025

Одобрена после рецензирования 16.06.2025

Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.849

ВЛИЯНИЕ УКЛОНА ЛЕСТНИЦ НА ПРОЦЕСС ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ

Парфененко Александр Павлович¹, Брюхов Евгений Николаевич², Ларченко Валерий Александрович³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

² Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ Управление надзорной деятельности и профилактической работы Главного управления МЧС России по Краснодарскому краю, г. Краснодар, Российская Федерация

Аннотация. Неоднозначность результатов моделирования процессов эвакуации людей и сложности современных возможностей архитектурных и конструктивных решений зданий требуют детальной проработки каждого параметра движения людских потоков. Существующие методы оценки безопасной эвакуации людей не учитывают влияние уклона лестничных маршей на процесс эвакуации людей, т. е. невозможно обосновать принятый уклон лестницы расчетным путем, также стоит отметить отсутствие экспериментальных данных по параметрам движения людей по лестничным маршам, имеющим различный уклон. В то же время уклон существенно влияет на основные параметры движения людских потоков. В статье рассмотрены проблемы моделирования процесса эвакуации людей по лестницам с различным уклоном, а также приведены результаты научных исследований людских потоков по маршам и площадкам лестниц с различным уклоном. Представленные результаты получены в ходе статистической обработки эмпирических данных. Вместе с тем установлена зависимость между параметрами людского потока при движении по лестницам с разным уклоном. Для подтверждения валидности полученных зависимостей были проведены численный эксперимент и сопоставительный анализ, позволяющие выполнить моделирование процессов эвакуации людей по маршам с различным уклоном.

Ключевые слова: пожарный риск, эвакуация, уклон лестниц, людской поток, пожар, проектирование

Для цитирования: Парфененко А. П., Брюхов Е. Н., Ларченко В. А. Влияние уклона лестниц на процесс эвакуации людей // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 57–69.

THE EFFECT OF THE STAIR SLOPE ON THE EVACUATION PROCESS OF PEOPLE

Alexander P. Parfenenko¹, Evgeniy N. Bryukhov², Valery A. Larchenko³

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Department of Supervision and Preventive Work of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Krasnodar Territory, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. The ambiguity of the results of modeling the evacuation processes of people and the complexity of modern capabilities of architectural and design solutions for buildings require a detailed study of each parameter of the movement of human flows. Existing methods for assessing the safe evacuation of people do not take into account the influence of the slope of stairways on the evacuation process of people, that is, it is impossible to justify the adopted slope of the stairs by calculation, it is also worth noting the lack of experimental data on the parameters of people's movement along stairways with different slopes. At the same time, the slope significantly affects the main parameters of the movement of human flows. The article considers the problems of modeling the process of evacuation of people along stairs with different slopes, and also presents the results of scientific studies of human flows along flights and landings of stairs with different slopes. The presented results were obtained during statistical processing of empirical data. At the same time, a relationship was established between the parameters of the human flow when moving along stairs with different slopes. To confirm the validity of the obtained dependencies, a numerical experiment and comparative analysis were carried out, allowing for modeling the processes of evacuation of people along flights with different slopes.

Keywords: fire risk, evacuation, staircase slope, human flow, fire, design

For Citation: Parfenenko A. P., Bryukhov E. N., Larchenko V. A. The effect of the stair slope on the evacuation process of people // *Technospheric safety*. 2025. № 3 (48). pp. 57–69.

Введение

Оценка безопасности людей в зданиях и сооружениях опирается на соблюдение двух критериев: своевременность и беспрепятственность эвакуации [1, 2]. Беспрепятственность движения людских потоков достигается за счет достаточной пропускной способности эвакуационного пути или выхода, исключающей давку

(скопление) людей на продолжительное время (1). При этом соблюдение критерия беспрепятственности оценивается по времени существования скопления, которое не должно превышать 6 мин [3]. Если расчетное значение интенсивности движения людских потоков на участке q_i не превышает максимальное значение $q_{\max}$, то время движения по i -му участку пути проходит беспрепятственно.

$$q_i \leq q_{\max} \quad (1)$$

где:

q_i — интенсивность движения людского потока по рассматриваемому i -му участку пути, м/мин;

$q_{\max}$ — максимальное значение интенсивности движения людей, м/мин.

По Методике [3] значение $q_{\max}$ может быть равным:

- 16,5 м/мин (горизонтальный путь);
- 19,6 м/мин (дверные проемы);
- 16,0 м/мин (лестница вниз);
- 11,0 м/мин (лестница вверх).

При несоблюдении условия (1) время существования скопления оценивается по формулам Методики [3] с учетом пропускной спо-

собности участка пути, на границе которого образовалась давка.

Критерий своевременной эвакуации людей основан на сопоставительном анализе результатов моделирования распространения опасных факторов пожара (далее — ОФП) и эвакуации людей на опасных участках движения людских потоков, характеризующих быстрое наступление критических значений ОФП (2).

$$t_p + t_{н.э} < 0,8 t_{бл}, \quad (2)$$

где:

t_p — расчетное время эвакуации людей, мин;

$t_{н.э,j}$ — время начала эвакуации людей, определяемое в зависимости от функционального назначения здания и времени срабатывания пожарных извещателей, мин;

$t_{бл}$ — время блокирования эвакуационных путей и выходов ОФП, мин.

Чтобы получить параметры движения людских потоков по различным видам эвакуационных путей, следует определить зависимость скорости движения людского потока (при любых эмоциональных состояниях) от его плотности [4]:

$$V = V_0 \left(1 - a \ln \frac{D}{D_0} \right), \quad (3)$$

где:

V_0 — скорость свободного движения людей в первом интервале плотности в зависимости от категории движения, м/мин;

a — коэффициент, указывающий на тип эвакуационного пути;

D — фактическое значение плотности потока, чел./м².

Эмоциональное состояние людей определяет характер их движения и, соответственно, зависимость изменения скорости людских потоков от плотности. Значения коэффициентов V_0 , a и D_0 представлены в [3] для различных групп эвакуируемого контингента. Но, к сожалению, параметры движения людей по лестницам с различным уклоном в Методике [3] отсутствуют, что не позволяет достоверно оценить количественную картину процесса эвакуации людей по лестницам и лестничным клеткам

различного уклона для подтверждения требований ст. 53 [1] при несоблюдении требований пожарной безопасности [2].

Сбор и систематизация эмпирических данных

Анализ научной литературы, затрагивающей вопросы движения людских потоков [4–18], позволил обобщить и систематизировать полученные ранее результаты исследований. Для установления расчетных

зависимостей между скоростью движения и плотностью потока людей по лестницам с различным уклоном использовалась методология, неоднократно апробированная на международных конференциях [19]. Суть предложенного метода заключается в определении значений величин a_j и D_{0j}

(3) методом наименьших квадратов, который в свою очередь может быть применим в результате аппроксимации эмпирических значений R_{Dj} .

По формуле (4) для необходимого интервала плотности людского потока вычисляются эмпирические значения R_{Dj} :

$$R_{Dj} = \Delta V_{Dj} / V_{0j}, \quad (4)$$

где:

$\Delta V_{Dj} = m(V_{0j}) - m(V_{Dj})$, m — математическое ожидание скоростей движения V_{0j} и V_{Dj} , значения которых даны в табл. 1–4.

Таблица 1

Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ при движении по лестнице вниз с уклоном 1 : 3,5

Table 1

Approximation of the dependence $R = f(D)$ when moving down stairs with a slope of 1 : 3,5

Статистические характеристики Statistical characteristics	Плотность людского потока, чел./м ² Density of human flow, people/m ²									
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
Математическое ожидание скорости $m(V)$, м/мин Mathematical expectation of speed $m(V)$, m/min	55,51	44,8	34,19	25,66	18,88	13,64	9,84	7,47	6,34	5,85
Среднее значение $\bar{R}_D$ The average value	—	0,193	0,384	0,538	0,660	0,754	0,823	0,866	0,886	0,895

Таблица 2

Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ при движении по лестнице вверх с уклоном 1 : 3,5

Table 2

Approximation of the dependence $R = f(D)$ when moving up the stairs upward with a slope of 1 : 3,5

Статистические характеристики Statistical characteristics	Плотность людского потока, чел./м ² Density of human flow, people/m ²									
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
Математическое ожидание скорости $m(V)$, м/мин Mathematical expectation of speed $m(V)$, m/min	53,32	36,77	25,31	20,59	18,76	17,22	14,89	12,47	10,05	9,18
Среднее значение $\bar{R}_D$ The average value	—	0,31	0,525	0,614	0,648	0,678	0,721	0,766	0,803	0,825

Таблица 3

Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ при движении по лестнице вниз с уклоном 1 : 1,5

Table 3

Approximation of the dependence $R = f(D)$ when moving down stairs with a slope of 1 : 1,5

Статистические характеристики Statistical characteristics	Плотность людского потока, чел./м ² Density of human flow, people/m ²									
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
Математическое ожидание скорости $m(V)$, м/мин Mathematical expectation of speed $m(V)$, m/min	47,76	38,85	29,27	21,911	16,29	11,75	8,48	6,46	5,47	5,06
Среднее значение $\bar{R}_D$ The average value	—	0,187	0,387	0,541	0,659	0,754	0,822	0,865	0,886	0,894

Таблица 4

Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ при движении по лестнице вверх с уклоном 1 : 1,5

Table 4

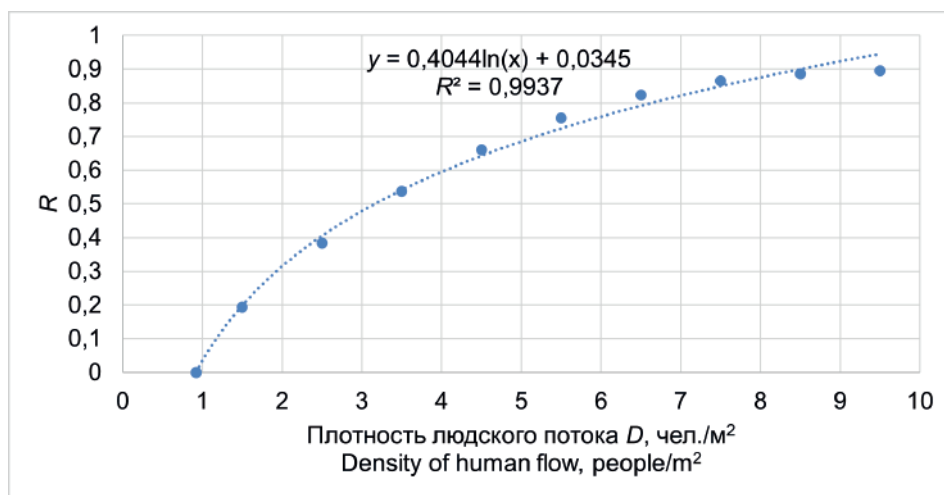
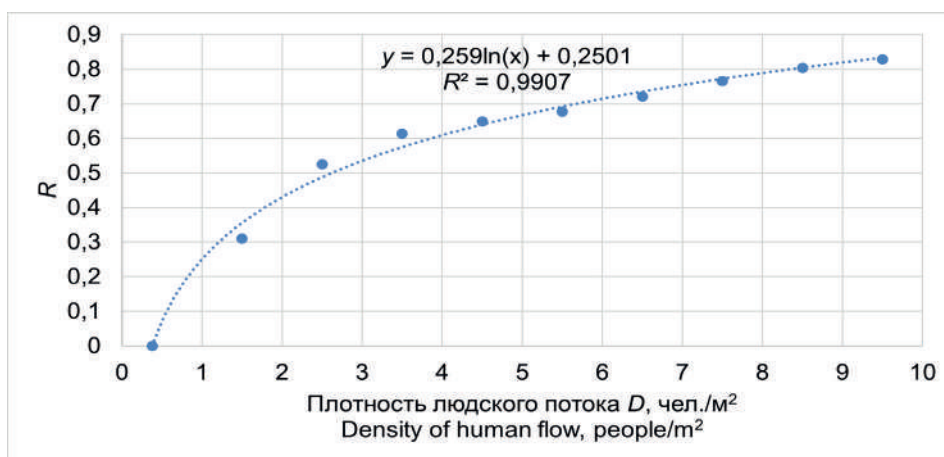
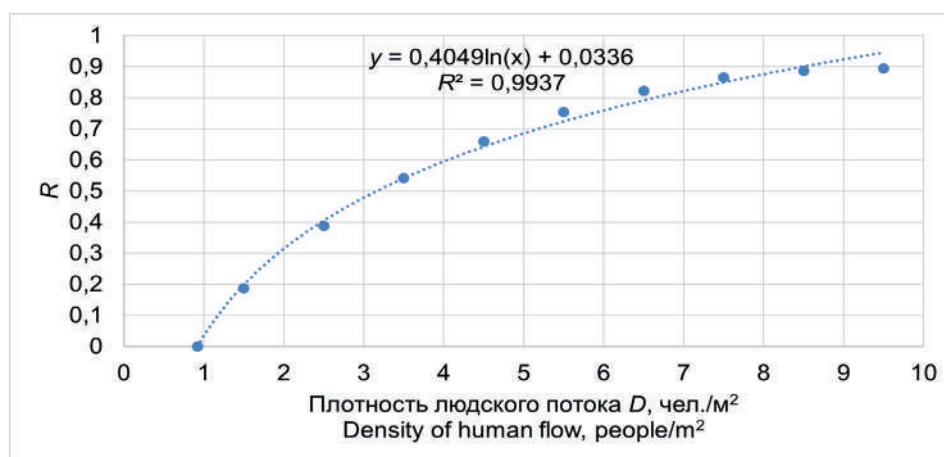
Approximation of the dependence $R = f(D)$ when moving up the stairs upward with a slope of 1 : 1,5

Статистические характеристики Statistical characteristics	Плотность людского потока, чел./м ² Density of human flow, people/m ²									
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
Математическое ожидание скорости $m(V)$, м/мин Mathematical expectation of speed $m(V)$, m/min	43,05	29,66	20,45	16,6	15,15	13,94	12,24	10,26	8,51	7,4
Среднее значение $\bar{R}_D$ The average value	—	0,311	0,525	0,615	0,648	0,676	0,716	0,761	0,802	0,828

Результаты выполненной аппроксимации показаны графиках (рис. 1–4). Статистическая обработка эмпирических данных позволила установить значения коэффициентов a_j и D_{0j} , которые приведены в табл. 5.

Угол наклона лестницы влияет на перемещение людей как при восходящем, так и при нисходящем движении. Данные, полученные в результате статистической обработки предыдущих эмпирических исследований, подтверждают этот вывод. Установленные путем аппроксимации

коэффициенты a_j и D_{0j} для случаев движения по лестнице вниз несущественно отличаются от величин, представленных в Методике [3]. Необходимо учесть, что полученные ранее эмпирические данные, характеризующие скорость движения людских потоков по лестницам с различным уклоном, соответствовали категории спокойного движения. При экстренной эвакуации следует брать во внимание уровень эмоционального состояния людей. Этот фактор заложен в величину V_0 , которая влияет на зависимость между параметрами движения людских потоков.

Рис. 1. Аппроксимирующая теоретическая зависимость R от плотности D (лестница вниз с уклоном 1:3,5)Fig. 1. Approximating the theoretical dependence of R on the density of D for stairs down with a slope of 1:3,5Рис. 2. Аппроксимирующая теоретическая зависимость R от плотности D (лестница вверх с уклоном 1:3,5)Fig. 2. Approximating the theoretical dependence of R on the density of D for stairs with an upward slope of 1:3,5Рис. 3. Аппроксимирующая теоретическая зависимость R от плотности D (лестница вниз с уклоном 1:1,5)Fig. 3. Approximating the theoretical dependence of R on the density of D for stairs down with a slope of 1:1,5

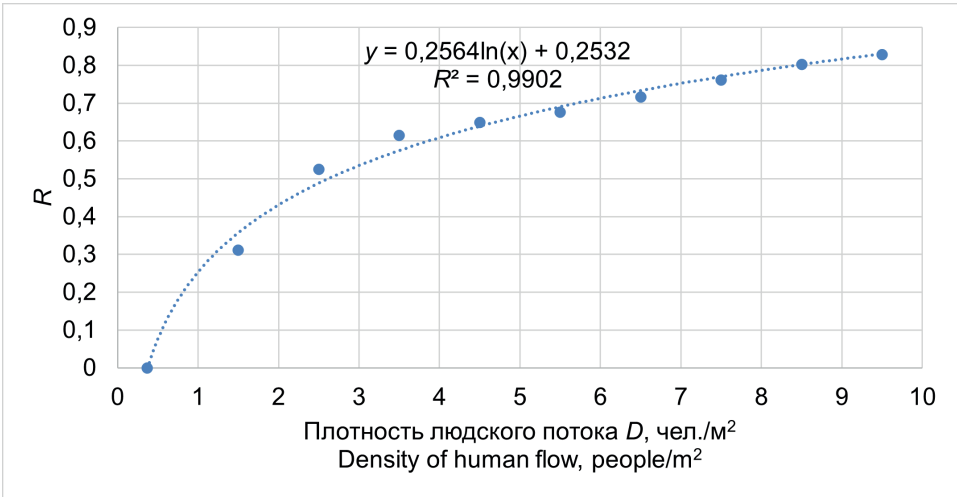


Рис. 4. Аппроксимирующая теоретическая зависимость R от плотности D (лестница вверх с уклоном 1 : 1,5)
Fig. 4. Approximating theoretical dependence of R on density of D for stairs up with a slope of 1 : 1,5

Таблица 5

Значения a_j и D_{oj} при движении людей по лестницам с различным уклоном

Table 5

The values of a_j and D_{oj} when people move up stairs with different slopes

Вид пути Type of path	Уклон The slope	a_j	D_{oj} чел./м² D_{oj} people/m²
Лестница вниз Stairs down	1 : 2 (Методика) 1:2 (Methodology)	0,4	0,89
	1 : 3,5	0,404	0,92
	1 : 1,5	0,405	0,92
Лестница вверх Stairs up	1 : 2 (Методика) 1 : 2 (Methodology)	0,305	0,67
	1 : 3,5	0,259	0,38
	1 : 1,5	0,257	0,38

Угол наклона лестницы влияет на перемещение людей как при восходящем, так и при нисходящем движении. Данные, полученные в результате статистической обработки предыдущих эмпирических исследований, подтверждают этот вывод. Установленные путем аппроксимации коэффициенты a_j и D_{oj} для случаев движения по лестнице вниз несущественно отличаются от величин, представленных в Методике [3]. Необходимо учесть, что полученные ранее эмпирические данные, характеризующие скорость движения людских потоков по лестницам с различным

уклоном, соответствовали категории спокойного движения. При экстренной эвакуации следует брать во внимание уровень эмоционального состояния людей. Этот фактор заложен в величину $V_{o\prime}$, которая влияет на зависимость между параметрами движения людских потоков.

Оценка влияния уклона лестниц на скорость свободного движения людей

Скорость свободного движения людских потоков изменяется в зависимости от уровня эмоционального состояния людей,

т. е. категории движения [19]. В Методике [3] в качестве расчетной скорости принята категория повышенной активности, что соответствует значению $V_0 = 100$ м/мин. Для анализа динамики изменения скорости свободного движения людских потоков по лестницам

с различным уклоном на рис. 5, 6 представлен график изменения V_0 в зависимости от уклона лестницы для категории спокойного движения с учетом данных, представленных в других литературных источниках [3, 7, 17].

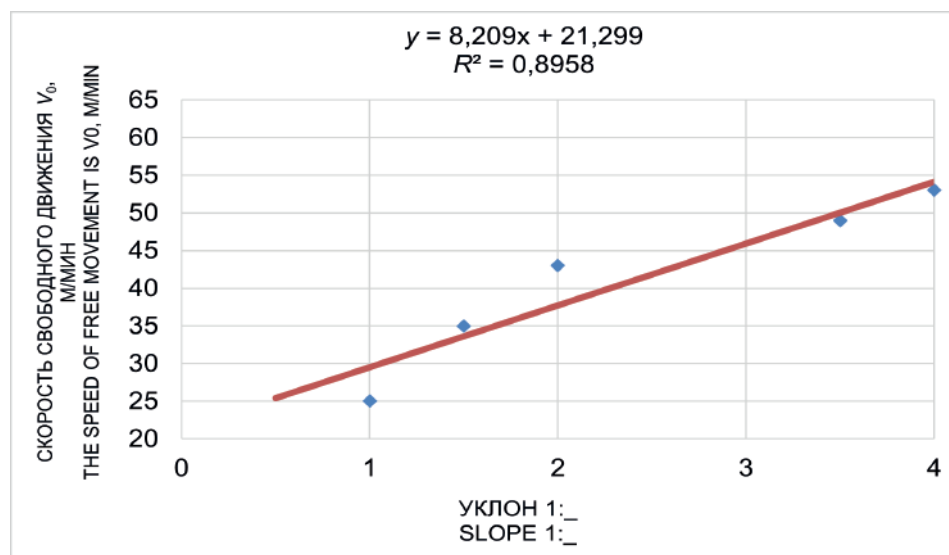


Рис. 5. Влияние уклона лестничного марша на скорость свободного движения людей по лестнице вверх

Fig. 5. The effect of the slope of the staircase on the speed of free movement of people up the stairs

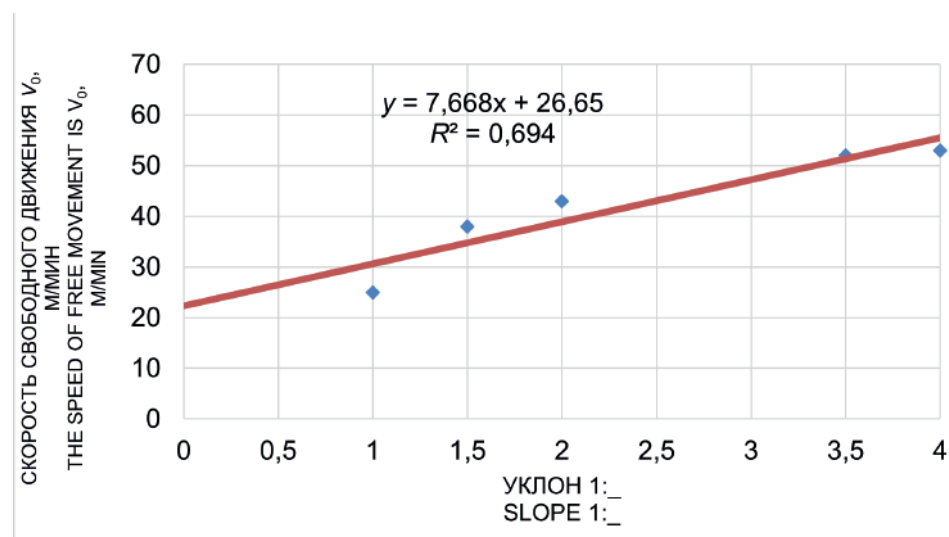


Рис. 6. Влияние уклона лестничного марша на скорость свободного движения людей по лестнице вниз

Fig. 6. The effect of the slope of the staircase on the speed of free movement of people down the stairs

Как видно из данных рис. 5, 6, уклон лестницы влияет на изменение скорости свободного движения людей и, как следствие, на процесс эвакуации. Скорость

свободного движения людей, например, по лестнице вниз с уклоном 1:1 почти в два раза ниже скорости движения по лестнице вниз с уклоном 1:2. Соответственно, чем

меньше уклон лестницы, тем люди быстрее пройдут наклонный участок эвакуационного пути. При этом не следует забывать и об оптимальных уклонах лестниц, которые дают возможность не только безопасно, но и комфортно передвигаться по ним.

При оценке планировочных решений объекта с точки зрения безопасности [1, 2] необходимо учитывать полученные параметры движения людских потоков, что позволит более точно и достоверно оценить вероятность эвакуации людей в случае возникновения пожара и величину индивидуального пожарного риска.

Моделирование процесса эвакуации людей по лестницам с различными уклонами

Исходные данные для моделирования

Численный эксперимент был осуществлен с помощью программы Pathfinder, которая предоставляет возможность интегрировать заданные зависимости при оценке времени эвакуации людей, используя индивидуально-поточную модель перемещения

людских потоков. Были построены упрощенные модели трех зданий с лестницами (рис. 7). Общее расчетное количество человек было принято 140. Агентам присваивались параметры движения по лестницам с различными уклонами, установленные после статистической обработки эмпирических данных [7, 17].

Результаты

Результаты численного эксперимента показали, что уклон лестницы влияет на расчетное время эвакуации людей. Анализ результатов показал, что при уклоне лестницы 1:1 расчетное время эвакуации составит 138 с, при уклоне 1:1,5 — 115 с, при уклоне 1:2 — 102 с и при уклоне 1:3,5 — 94 с. Плотность людского потока на лестницах находилась в диапазоне от 3 до 5 чел./м². При этом скорость людского потока составила 0,42–0,81 м/с.

Следует отметить, что моделирование эвакуации проводилось для простой модели здания, где рассматривалась эвакуация и слияние на лестнице 140 человек. На реальном объекте результаты могут значительно отличаться друг от друга.

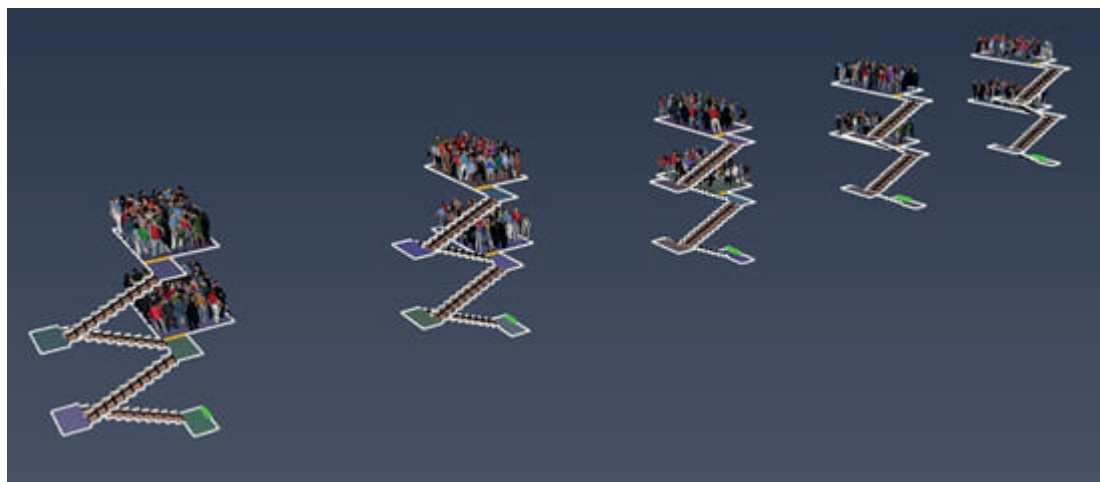


Рис. 7. Модель трехэтажного здания

Fig. 7. Model of a three-storey building

Заключение

Расчет индивидуального пожарного риска не может быть выполнен без оценки безопасной эвакуации людей при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений, которая должна включать большое количество аспектов, в т. ч. и особенности движения людских потоков по лестницам. Как уже отмечалось, действующая редакция Методики [3] не описывает параметры движения людских потоков при эвакуации по лестницам с различным уклоном.

Статистический анализ ранее полученных эмпирических данных позволил установить зависимость между скоростью и плотностью людского потока по эвакуационным путям с учетом уклона. При этом выявленные зависимость и параметры потока людей отличаются от данных, представленных в Методике [3], где при моделировании эвакуации по лестницам и лестничным клеткам

используются параметры движения людей по лестницам с уклоном 1 : 2.

Кроме того, рассчитанные коэффициенты a_j и D_{oj} дают возможность установить связь между скоростью и плотностью людского потока, принимая во внимание его эмоциональное состояние и интенсивность движения по лестницам с различным уклоном. Учет полученных результатов в практике проектирования объектов позволяет достоверно оценить пути эвакуации с точки зрения выполнения критериев своевременности и беспрепятственности [1].

В дальнейшем планируется проведение дополнительных экспериментальных исследований и натурных наблюдений в области движения людских потоков различного состава по лестницам с целью пополнения существующей эмпирической базы и выявления факторов, влияющих на качественную и количественную картину процесса эвакуации людей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.10.2024).
2. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы : утв. приказом МЧС России от 19.03.2020 № 194 : введ. в действие 19.09.2020 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.ru/3NjnmJ> (дата обращения: 24.06.2025).
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140 : зарег. в Минюсте РФ 20.03.2023 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://clck.ru/34X4rc> (дата обращения: 10.04.2025).
4. Беляев С. В. Эвакуация зданий массового назначения. М., 1938. 72 с.

5. Милинский А. И. Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения : дис. ... канд. техн. наук. М., 1951. 178 с.
6. Калинин В. А. Проектирование залов кинотеатров с учетом движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1966. 186 с.
7. Дувидзон Р. М. Проектирование спортивных сооружений с учетом движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1968. 173 с.
8. Холщевников В. В. Оптимизация путей движения людских потоков. Высотные здания : дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 251 с.
9. Еремченко М. А. Движение людских потоков в школьных зданиях : дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 186 с.
10. Копылов В. А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации : дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 145 с.
11. Wood P. G. The Behaviour of People in Fires // Fire Research Note. 1972. № 953.
12. Холщевников В. В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 442 с.
13. Никонов С. А. Разработка мероприятий по организации эвакуации при пожарах в зданиях с массовым пребыванием людей на основе моделирования движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 318 с.
14. Холщевников В. В. Исследование людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре : монография. М., 1999. 93 с.
15. Larusdottir A. R., Dererichs A. S. Evacuation dynamics of children – walking speed, flow through doors in day care centers // Proceedings of the 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics/Gaithersburg (USA). 2010. pp. 67–79.
16. Bruck D., Tomas I. Community based research on the effectiveness of the home smoke alarm in waking up children // Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire / Cambridge (UK). 2009. pp. 335–344.
17. Истратов Р. Исследование параметров движения людей по пожарным лестницам // Пожарное дело. 2018. № 1. С. 13–15.
18. Самошин Д. А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 357 с.
19. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Исаевич И. И. Натурные наблюдения людских потоков. М., 2009. 191 с.

REFERENCES

1. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law № 123-FZ : adopted by the State Duma on 04.07.2008 : approved by the Federation Council on 11.07.2008 // Garant ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (date of application: 24.10.2024).
2. SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Evacuation routes and exits : approved by Order № 194 of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 19.03.2020 : effective as of 19.09.2020 //

Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://clck.ru/3NjnmJ> (date of application: 24.06.2025).

3. Methodology for Determining Calculated Fire Risk values in Buildings, structures and Fire compartments of various functional fire hazard classes : approved by Order № 1140 of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation dated 14.11.2022 : registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 20.03.2023 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://clck.ru/34X4rc> (date of application: 10.04.2025).

4. Belyaev S. V. Evacuation of mass buildings. M., 1938. 72 p.

5. Milinsky A. I. Study of the process of evacuation of mass buildings : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1951. 178 p.

6. Kalintsev V. A. Designing cinema halls taking into account the movement of human flows : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1966. 186 p.

7. Duvidzon R. M. Designing sports facilities taking into account the movement of human flows : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1968. 173 p.

8. Kholshchevnikov V. V. Optimization of the ways of movement of human flows. High-rise buildings : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1969. 251 p.

9. Eremchenko M. A. The movement of human flows in school buildings : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1978. 186 p.

10. Kopylov V. A. Investigation of the parameters of human movement during forced evacuation : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1974. 145 p.

11. Wood P. G. The Behaviour of People in Fires // Fire Research Note. 1972. № 953.

12. Kholshchevnikov V. V. Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : doctoral dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. M., 1983. 442 p.

13. Nikonov S. A. Development of measures for the organization of evacuation in case of fires in buildings with a mass presence of people based on modeling the movement of human flows : Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree. M., 1985. 318 p.

14. Kholshchevnikov V. V. Research of human flows and methodology of rationing evacuation of people from buildings in case of fire : monograph. M., 1999. 93 p.

15. Larusdottir A. R., Dererichs A. S. Evacuation dynamics of children – walking speed, flow through doors in day care centers // Proceedings of the 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics/Gaithersburg (USA). 2010. pp. 67–79.

16. Bruck D., Tomas I. Community based research on the effectiveness of the home smoke alarm in waking up children // Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire / Cambridge (UK). 2009. pp. 335–344.

17. Istratov R. Investigation of the parameters of human movement on fire escapes // Fire fighting. 2018. № 1. pp. 13–15.

18. Samoshin D. A. Methodological foundations of rationing the safe evacuation of people from buildings in case of fire : doctoral dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. M., 2017. 357 p.

19. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Isaevich I. I. Field observations of human flows. M., 2009. 191 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Парфененко Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское ш., д. 26); РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000 0001 7490 8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Брюхов Евгений Николаевич, канд. пед. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 767262; e-mail: bryukhov@mail.ru

Ларченко Валерий Александрович, начальник отделения Управления надзорной деятельности и профилактической работы Главного управления МЧС России по Краснодарскому краю (350080, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Уральская, д. 121); e-mail: Larchenco@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander P. Parfenenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation); ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000 0001 7490 8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Evgeniy N. Bryukhov, Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor of the Department of Fire Safety in Construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 767262; e-mail: bryukhov@mail.ru

Valery A. Larchenko, Head of the Department of Supervision and Preventive Work of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Krasnodar Territory (121 Uralskaya St., Krasnodar, 350080, Russian Federation); e-mail: Larchenco@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2025
Одобрена после рецензирования 02.06.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 53.089.6

ПЛАНИРОВАНИЕ ЛОГИСТИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Гарелина Светлана Александровна, Латышенко Константин Павлович, Любкин Роман Николаевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье предложена методика планирования логистики выполнения поверочных работ с использованием риск-ориентированного подхода, предназначенная для повышения эффективности метрологического обеспечения в структурах МЧС России. Рассматриваются возможности применения подвижных метрологических лабораторий для проведения выездной поверки средств измерений с целью минимизации времени их изъятия из эксплуатации и, как следствие, снижения риска возможных аварий и чрезвычайных ситуаций, который представляет собой вероятный ущерб от аварии, выраженный в рублях. Методика основывается на ранжировании территориальных органов МЧС по уровню риска и выборе приоритетных направлений для поверки. Учитываются ограниченные ресурсы подвижной метрологической лаборатории, включая количество доступных поверителей и транспортные возможности. Представлен алгоритм оптимизации маршрутов и расчет рационального перечня объектов для выездной поверки. Численный пример демонстрирует практическое применение подхода и подтверждает его эффективность в минимизации риска при выполнении поверочных работ. Методика может быть использована для планирования метрологического обеспечения в других организациях с аналогичными условиями.

Ключевые слова: средства измерений, поверка, подвижная метрологическая лаборатория, логистика, распределение средств измерений, алгоритм, риск, авария/ЧС, территориальные органы и учреждения МЧС России

Для цитирования: Гарелина С. А., Латышенко К. П., Любкин Р. Н. Планирование логистики выполнения поверочных работ с учетом риск-ориентированного подхода // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 70–80.

PLANNING THE LOGISTICS OF PERFORMING VERIFICATION WORK TAKING INTO ACCOUNT A RISK-BASED APPROACH

Svetlana A. Garelina, Konstantin P. Latyshenko, Roman N. Lyubkin
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article proposes a methodology for planning the logistics of performing verification work using a risk-based approach, designed to increase the efficiency of metrological support in the structures of the Ministry of Emergency Situations of Russia. The possibilities of using mobile

metrological laboratories for on-site verification of measuring instruments are considered in order to minimize the time of their decommissioning and, as a result, reduce the risk of possible accidents and emergencies, which represents the probable damage from an accident, expressed in rubles. The methodology is based on the ranking of the territorial bodies of the Ministry of Emergency Situations according to the level of risk and the selection of priority areas for verification. The limited resources of the PML are taken into account, including the number of available verifiers and transportation options. An algorithm for optimizing routes and calculating a rational list of facilities for on-site verification is presented. The numerical example demonstrates the practical application of the approach and confirms its effectiveness in minimizing risk during verification work. The methodology can be used for planning metrological support in other organizations with similar conditions.

Keywords: measuring instruments, verification, mobile metrological laboratory, logistics, distribution of measuring instruments, algorithm, risk, accident/emergency, territorial bodies and institutions of the EMERCOM of Russia

For Citation: Garelina S. A., Latyshenko K. P., Lyubkinh R. N. Planning the logistics of performing verification work taking into account a risk-based approach // *Technospheric safety*. 2025. № 3 (48). pp. 70–80.

Введение

В территориальных органах и учреждениях МЧС России эксплуатируют большое количество средств измерений (далее — СИ), и поскольку они предназначены для применения в сфере государственного регулирования и обеспечения единства измерений, то согласно Федеральному закону от 26.06.2008 № 102-ФЗ подлежат первичной, а в процессе эксплуатации — периодической поверке, как правило, ежегодной [1]. Поверку СИ осуществляют для подтверждения их соответствия установленным в нормативно-технической документации метрологическим требованиям.

В МЧС России за планирование и проведение метрологического обслуживания территориальных органов и учреждений МЧС России, метрологические работы по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства, поддержа-

ние в исправном состоянии и применение государственных эталонов единиц величин для обеспечения единства измерений отвечает Центральное бюро измерительной техники МЧС России (далее — ЦБИТ).

В МЧС России СИ применяют для измерения параметров и характеристик следующих объектов измерений:

- военной и специальной техники, пожарно-спасательного оборудования;
- зданий и сооружений;
- пространства и времени;
- материалов, веществ, продуктов;
- здоровья личного состава.

В 2023 г., согласно данным ЦБИТ, число СИ, подлежащих поверке, составило 59 113 единиц, и с каждым годом их количество увеличивается [2]. В МЧС России эксплуатируют 10 видов СИ, из которых 81 % составляют СИ давления и вакуума и 10 % — СИ характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант.

Постановка задачи

ЦБИТ и его филиалы в федеральных округах [3] осуществляет поверку СИ двумя способами:

- стационарно, т. е. непосредственно в аккредитованных метрологических организациях;
- в подразделениях, эксплуатирующих СИ, с помощью приезжающих к ним выездных метрологических групп.

Стационарный способ поверки СИ в МЧС России реализует ЦБИТ, его филиалы, а также действующие на коммерческой основе аккредитованные метрологические организации. Для такой поверки СИ доставляют в поверяющую организацию (иногда за сотни километров), поверяют и возвращают назад. В соответствии с приказом МЧС России от 31.11.2021 № 833 [3] время поверки СИ не должно превышать одного месяца, но в течение того времени, что занимает поверка, техника и оборудование, с которых сняты СИ, могут быть при отсутствии обменного фонда неработоспособны, что негативно отражается на технической готовности подразделения МЧС России, и что в свою очередь повышает риск получения значительного ущерба при возникновении аварии/ЧС.

Использование мобильной поверки СИ на месте их эксплуатации полностью исключает время транспортировки СИ туда и обратно и существенно увеличивает техническую готовность подразделений МЧС России к выполнению своих обязанностей. Мобильная поверка СИ рекомендована Руководством по обеспечению единства измерений в МЧС России [3].

Кроме того, выездные метрологические группы зачастую могут осуществлять поверку СИ на технике и оборудовании, не де-

монтируя их, прямо на рабочем месте, что уменьшает время поверки до минимально возможного.

Для проведения поверки СИ с помощью выездных метрологических групп была разработана и введена в эксплуатацию подвижная метрологическая лаборатория (далее — ПМЛ). ПМЛ позволила существенно снизить нагрузку на ЦБИТ, с ее помощью можно осуществлять поверку 7 из 10 видов СИ, что, в свою очередь, составляет около 87 % от их общего числа. Остальные СИ для проведения поверки доставляют, как правило, в ЦБИТ.

Выберем СИ, которые будем поверять с помощью ПМЛ.

Это СИ давления и вакуума, которые, во-первых, составляют подавляющее большинство используемых в МЧС России приборов. Во-вторых, средства поверки манометров и вакуумметров легко помещаются в ограниченном пространстве кузова. В то время как, например, для поверки газоанализатора в пяти точках диапазона измерений необходимо кроме достаточно габаритной поверочной установки иметь пять баллонов с поверочной газовой смесью. Для поверки газоанализатора на другую концентрацию или вещество потребуется уже другие пять баллонов и т. д.

В зоне ответственности территориальных органов МЧС России расположены различные объекты и предприятия. Все они характеризуются определенным риском аварий/ЧС, величину которого можно рассчитать по соответствующим методикам, например [4, 5].

Таким образом, актуальна потребность в разработке методики, которая позволит выбрать такие территориальные органы и СИ в них для поверки в условиях ограни-

ченных возможностей ПМЛ, чтобы максимально уменьшить возможный риск аварий/ЧС. Это можно осуществить рациональным выбором числа ПМЛ, количества поверителей, маршрута движения ПМЛ и др.

В работе [6] представлен пример решения задачи по оптимизации планирования логистики выполнения поверочных работ как в стационарных условиях метрологической лаборатории, так и в местах эксплуатации СИ с учетом ограничения на месячный пробег мобильного метрологического комплекса. Для решения этой проблемы авторами предложен алгоритм, аналогичный задаче о рюкзаке, т. е. NP-полной задаче комбинаторной оптимизации.

Сформулируем математическую постановку задачи.

При заданных: количестве СИ, которое ПМЛ может поверить за год ($N_{\text{ПМЛ}}$), шт.; количестве СИ, которое необходимо поверить за год (N), шт.; значении минималь-

ного ($R_{\min}$) и максимального ($R_{\max}$) рисков аварий/ЧС, произошедших во время изъятия СИ на поверку, руб.; количестве территориальных органов (T), ед.; принятых рангах (приоритетах) P_1, P_2, P_3 величины риска $R_{\max}$ аварий/ЧС в территориальных органах, — необходимо определить рациональное множество территориальных органов и учреждений МЧС России ($T_{\text{рац}}$), в которых будет осуществлена поверка за счет ПМЛ, чтобы максимально снизить возможный риск аварий/ЧС, произошедших во время изъятия СИ на поверку:

при следующих ограничениях:

- в первую очередь поверяют СИ в тех территориальных органах и учреждениях МЧС России, где возможный ущерб от аварий/ЧС выше;
- $T_{\text{рац}} \in T$; число поверенных СИ ($N_{\text{пов}}$) не может превысить технические возможности ПМЛ, т. е. $N_{\text{пов}} \leq N_{\text{ПМЛ}}$.

$$R(T_{\text{рац}}) = f(N_{\text{ПМЛ}}, N, T, R_{\min}, R_{\max}, P_1, P_2, P_3) \rightarrow \min, \quad (1)$$

Решение задачи

Методика планирования логистики выполнения поверочных работ с учетом риск-ориентированного подхода.

$$\Delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{3}, \quad (2)$$

где:

$R_{\min}$ — минимальное значение риска R , руб.;

$R_{\max}$ — максимальное значение риска R , руб.;

ΔR — размах значений риска, руб.

Примем следующие интервалы:

- низкий ранг P_3 у k -го территориального органа: $R_{\min} < R_k < R_{\min} + \Delta R$;

1. Осуществим ранжирование территориальных органов и учреждений МЧС России в соответствии с величиной риска аварий/ЧС (R) в зоне их ответственности и их разбиение на три группы риска по формуле:

- средний ранг P_2 у j -го территориального органа: $R_{\min} + \Delta R < R_j < R_{\min} + 2\Delta R$;
- высокий ранг P_1 у i -го территориального органа: $R_{\min} + 2\Delta R < R_i < R_{\max}$.

2. Оценим возможности ПМЛ по поверке СИ в территориальных органах и учреждениях МЧС России в соответствии с их рангами.

Условие достаточности ресурса ПМЛ равняется формуле (3), где N_{P1} , N_{P2} , N_{P3} — суммарное количество СИ в территориальных органах и учреждениях МЧС России, входящих в соответствующий ранг.

3. Определим множество территориальных органов и учреждений МЧС России ($T_{\text{рац}}$) с рангом P , в которых ПМЛ проведет поверку в соответствии со следующими условиями:

- условие достаточности ресурса ПМЛ для поверки СИ в территориальных органах и учреждениях МЧС России с рангом P : $N_{\text{ПМЛ}} < N_P$;
- выбор территориального органа для поверки СИ: сначала с высоким уровнем риска — P_1 , затем со средним — P_2 , и, наконец, с низким уровнем — P_3 .

Далее с помощью методики выбора рационального маршрута ПМЛ при составлении плана командировок выездных метрологических групп и соответствующей программы [7] можно оптимизировать маршрут ПМЛ таким образом, чтобы минимизировать протяженность (время) прохождения маршрута, включающего все территориальные органы из рационального перечня $T_{\text{рац}}$.

На основе приведенной методики был разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рис., и программа в Excel по ее реализации.

Рассмотрим пример использования предложенной методики при следующих

Методом перебора формируем такую совокупность территориальных органов МЧС России ($T_{\text{рац}}$), чтобы количество СИ в ней было бы максимально близко к возможностям ПМЛ: $N_{T_{\text{рац}}} \sim N_{\text{ПМЛ}}$.

Формируем рациональный перечень территориальных органов ($T_{\text{рац}}$), в котором суммарное количество СИ было бы максимально близко к возможностям ПМЛ, а число самих органов было бы минимальным, т. е. $T_{\text{рац}} \rightarrow \min$.

Таким образом получаем перечень территориальных органов МЧС России и количество СИ в них. Этот перечень позволяет, во-первых, минимизировать риск аварий/ЧС, которые могут произойти на этих территориях, и, во-вторых, поверить эти СИ с помощью ПМЛ.

$$N_{\text{ПМЛ}} \geq N_{P1} + N_{P2} + N_{P3}, \quad (3)$$

данных: число территориальных органов МЧС России — 20; максимальный и минимальный риск аварий/ЧС — 132 и 995 млн руб. соответственно; число СИ, которое может поверить ПМЛ, — 800 шт.; число СИ в каждом из 20 территориальных органах — 87, 58, 45, 43, 41, 34, 100, 94, 88, 36, 30, 43, 81, 41, 21, 53, 60, 96, 76 и 80 соответственно; общее число СИ, подлежащих поверке, — 1 207 шт.

В табл. 1 приведены результаты расчета значений риска для ТО рангов P_1 , P_2 и P_3 для заданных исходных данных.

В табл. 2 приведены результаты расчета по разработанной методике.

Таблица 1

Результаты расчета значений риска для ТО с рангами P_1 , P_2 и P_3 для заданных исходных данных

Table 1

Results of calculating risk values for TO ranks P_1 , P_2 , and P_3 for the given initial data

$R_{j \min}$, млн руб. $R_{j \min}$ mln.rub.	$R_{j \max}$, млн руб. $R_{j \max}$ mln.rub.	Размах ΔR , млн руб. Range ΔR , mln. rub.	Риск ранга P_1 , млн руб. Rank risk P_1 mln.rub.	Риск ранга P_2 , млн руб. Rank risk P_2 mln.rub.	Риск ранга P_3 , млн руб. Rank risk P_3 mln.rub.
132	995	288	707–995	418–706	132–419

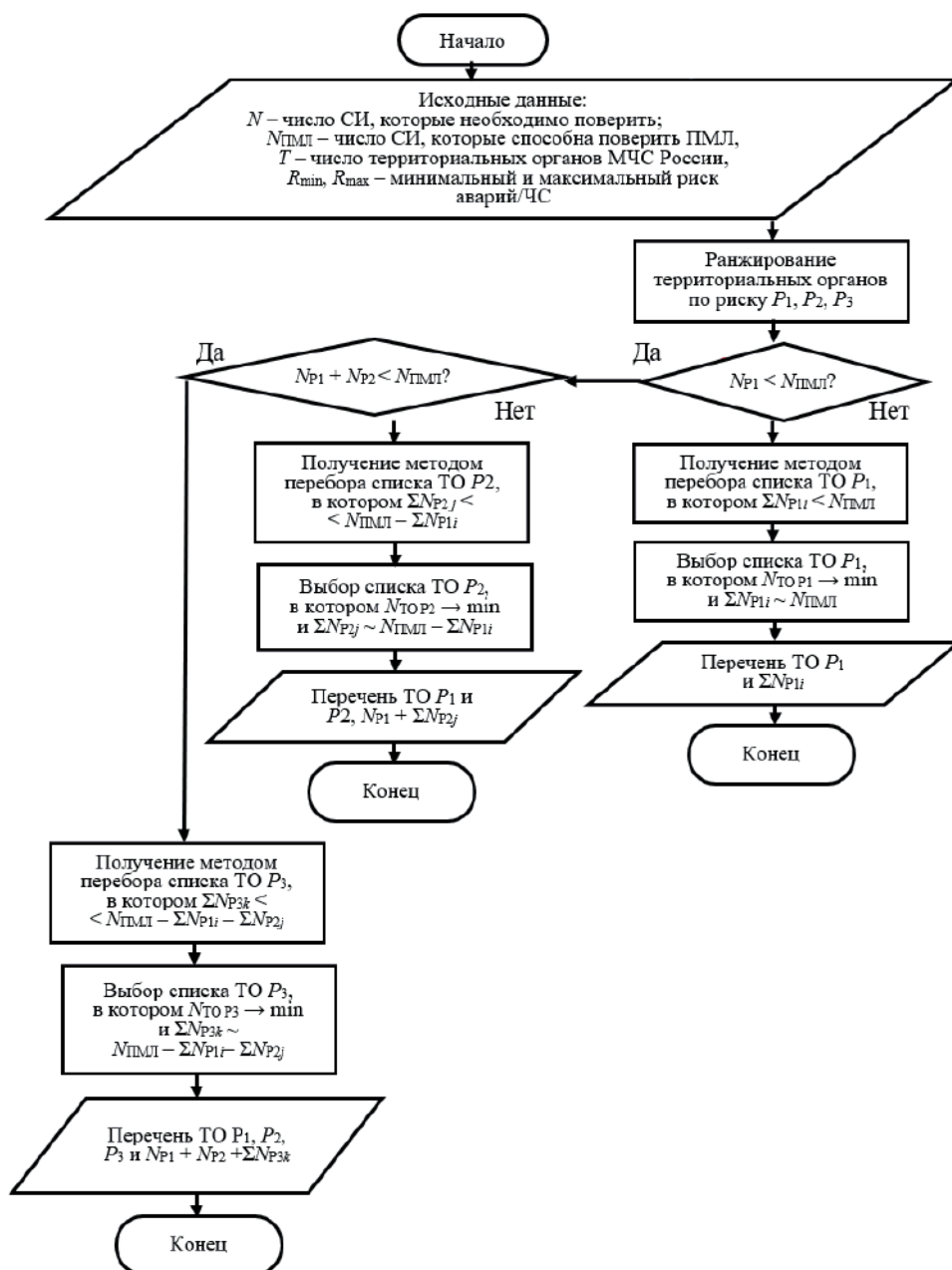


Рис. Блок-схема алгоритма планирования логистики выполнения поверочных работ с учетом риск-ориентированного подхода

Fig. Flowchart of the logistics planning algorithm for performing verification work, taking into account the risk-based approach

Таблица 2

**Результаты нахождения рационального множества территориальных органов и учреждений
МЧС России, в которых поверку СИ осуществляют с помощью ПМЛ**

Table 2

The results of finding a rational set of territorial bodies and institutions of the Ministry
of Emergency Situations of Russia, in which SI verification is carried out using PML

ТО и У TO and U	Риск R_j , млн руб. Risk R_j mln.rub.	Ранг Rank	N	СИ на поверку SI for verification			P_1	P_2						
				P_1	P_2	P_3		4-8-9- 10-14- 15-16- 19-20	1-3-5	1-3- 5-6	1-3-5- 13	1-3- 12-13	3-6- 12-13	3-5- 12-13
1	689	2	87		87			87	87	87	87			
2	372	3	58											
3	625	2	45		45		86	45	45	45	45	45	45	45
4	755	1	43	43			43							
5	461	2	41		41			41	42	42			41	
6	517	2	34		нет				34			34		34
7	342	3	100			нет								
8	789	1	94	94			94							
9	844	1	88	88			88							
10	791	1	36	36			36							
11	443	2	30		нет									30
12	615	2	41		нет						41	41	41	41
13	637	2	43		43					43	43	43	43	43
14	953	1	81				81							
15	995	1	21				21							
16	939	1	53				53							
17	366	3	60			нет								
18	132	3	96			нет								
19	946	1	76				76							
20	869	1	80				80							
Σ			1207	572	216	нет	572	173	207	216	216	204	200	193

Проанализируем результаты расчетов.

Рассчитали возможность ПМЛ по поверке СИ последовательно для каждого из трех рангов, начиная с самого высокого — P_1 (стб. 5).

В представленном примере возможностей ПМЛ хватает на поверку всех 572 СИ в территориальных органах МЧС России ранга P_1 ($N_{P_1} = 572 < N_{\text{ПМЛ}} = 800$).

В примере возможностей ПМЛ не хватает на поверку 93 СИ ($N - N_{P_1} - N_{P_2} = 800 - 572 - 321 = -93$ СИ) в территориальных органах МЧС России ранга P_2 , она может поверить только 228 СИ (стб. 6).

СИ из территориальных органов ранга P_3 не будут поверены вовсе.

В стб. 7 представлены результаты расчета суммарного количества СИ, которые могут быть поверены ПМЛ, в территориальных органах и учреждениях МЧС России ранга P_2 для разных их комбинаций.

Условию $\sum N_{P_{2j}} \sim N_{\text{ПМЛ}} - \sum N_{P_{1i}}$ соответствуют следующие варианты: 1-3-5, 1-3-5-6, 1-3-5-13, 1-3-12-13, 3-6-12-13, 3-5-12-13 и 3-6-11-12-13, где цифры означают порядковый номер территориального органа МЧС России в табл. 2. Из них рациональными вариантами являются 1-3-5-13 и 1-3-12-13 с одинаковым числом поверенных СИ — 216 приборов. Поэтому выбор одного варианта из этих двух может быть обусловлен дополнительными условиями, например минимальной длиной маршрута ПМЛ, пусть это будет вариант 1-3-5-13.

Таким образом, выездная метрологическая группа может поверить все СИ (572 шт.) в девяти территориальных органах МЧС России ранга P_1 (4-8-9-10-14-15-16-19-20) и 216 СИ в четырех органах ранга P_2 (1-3-5-13).

Остальные 419 СИ (105 СИ в трех органах ранга P_2 и 314 СИ в четырех органах ранга P_3) должны быть отправлены на поверку в ЦБИТ.

Методика позволила определить рациональный перечень территориальных органов МЧС России с наибольшим риском аварий/ЧС (ранг P_1 и P_2) — 13 — и количество СИ в них — 788 — при том, что ПМЛ может поверить 800 СИ.

Выводы

1. Актуальность работы обусловлена снижением технической готовности территориальных органов и учреждений МЧС России выполнять поставленные задачи из-за недееспособности оборудования, эксплуатирующего СИ, находящиеся в этот момент на поверке в ЦБИТ, что ведет к увеличению возможного ущерба при возникновении аварий/ЧС.
2. Предложена методика и алгоритм планирования логистики выполнения поверочных работ с учетом риск-ориентированного подхода, которые позволяют выбрать средства измерений для выездной поверки с учетом риска аварий/ЧС в зоне ответственности территориальных органов и учреждений МЧС России.
3. Приведен численный пример определения рационального перечня территориальных органов МЧС России и средств измерений в них, обеспечивающий минимальный риск аварий/ЧС, которые могут произойти во время изъятия средств измерений на поверку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об обеспечении единства измерений : Федер. закон № 102-ФЗ : принят Государственной Думой 11.07.2008 : одобрен Советом Федерации 18.06.2008 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (дата обращения: 02.03.2025).
2. Гарелина С. А. Латышенко К. П., Любкин Р. Н. Актуальность применения подвижных метрологических лабораторий в структурах МЧС России // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. мат. XV Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2024. С. 45–50.
3. Об утверждении Руководства по обеспечению единства измерений в Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий : приказ МЧС России от 30.11.2021 № 833 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (дата обращения: 02.03.2025).
4. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560438170> (дата обращения: 02.03.2025).
5. Бродников О. В. Современная методология оценки риска чрезвычайных ситуаций // Главное управление МЧС России по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре : сайт. URL: <https://clck.ru/3P8Ye9> (дата обращения: 02.03.2025).
6. Ершова К. А., Савина С. Е. Задача оптимизации планирования логистики выполнения поверочных работ // Вестник науки. 2022. № 11 (56). С. 244–252.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619871 Российская Федерация. Программа расчета рационального маршрута подвижной метрологической лаборатории при составлении плана командировок выездных метрологических групп : № 2024692343 : заявл. 25.12.2024 : опубл. (зарег.) 18.04.2025 / Р. Н. Любкин [и др.] ; заявитель АГЗ МЧС России.

REFERENCES

1. On Ensuring the Uniformity of Measurements : Federal Law № 102-FZ adopted by the State Duma on 11.07.2008 : approved by the Federation Council on 18.06.2008 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (date of application: 02.03.2025).
2. Garelina S. A., Latyshenko K. P., Lyubkin R. N. The relevance of the use of mobile metrological laboratories in the structures of the Ministry of Emergency Situations of Russia // Reliability and durability of machines and mechanisms : Collection of Materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference. Ivanovo, 2024. pp. 45–50.
3. On approval of the Guidelines for Ensuring the Uniformity of Measurements in the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters : order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 30.11.2021 № 833 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (date of application: 02.03.2025).

4. A unified interdepartmental methodology for assessing damage from man-made, natural and terrorist emergencies, as well as classifying and accounting for emergencies // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560438170> (date of application: 03.02.2025).

5. Brodnikov O. V. Modern methodology for assessing the risk of emergency situations // Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra : website. URL: <https://clck.ru/3P8Ye9> (date of application: 02.03.2025).

6. Yershova K. A., Savina S. E. The task of optimizing logistics planning for performing verification work // Bulletin of Science. 2022. № 11 (56). pp. 244–252.

7. Certificate of state registration of the computer program No. 2025619871 Russian Federation. The program for calculating the rational route of a mobile metrological laboratory when drawing up a business trip plan for visiting metrological groups : № 2024692343 : application dated 25.12.2024 : published on 18.04.2025 / R. N. Lyubkin et al. ; applicant AGZ of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Латышенко Константин Павлович, д-р техн. наук, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 1878-3258; AuthorID: 538521; e-mail: kplat@mail.ru

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str., Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Konstantin P. Latysenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str., Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-код: 1878-3258; AuthorID: 538521; e-mail: kplat@mail.ru

Roman N. Lyubkin, Lecturer of the Department of the Exploitation of Transport-technological Machines and Complexes Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str., Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025
Одобрена после рецензирования 11.06.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 53.089.6

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ВЫЕЗДНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП МЧС РОССИИ

Любкин Роман Николаевич

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлена методика проектирования маршрутов движения выездных метрологических групп для проведения поверки средств измерений в территориальных органах МЧС России с учетом ограничения времени на командировки. Предложенная методика основана на совместном применении нескольких методик, таких как жадный метод и метод имитации отжига, а также введении ряда дополнительных переменных и ограничений, учитывающих время проведения поверки и иных работ. Совместное применение методик оптимизации транспортных задач позволяет решить задачу с большим количеством территориальных органов и учреждений МЧС России, минимальными затратами ресурсов на расчеты и получением наиболее выгодного маршрута пути движения. Время, отводимое на командировку, а также ряд других ограничений, позволили получить наиболее точные данные для построения маршрутов движения выездных метрологических групп. Применение разработанной методики позволило значительно сократить суммарный пройденный путь и уменьшить количество командировок.

Ключевые слова: средство измерений, поверка, транспортная задача, метод ветвей и границ, динамическое программирование, метод отжига, оптимизация, территориальные органы МЧС

Для цитирования: Любкин Р. Н. Методика оптимизации маршрутов движения выездных метрологических групп МЧС России // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 81–91.

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE ROUTES OF THE VISITING METROLOGICAL GROUPS OF THE EMERCOM OF RUSSIA

Roman N. Lyubkin

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The paper presents a methodology for designing routes for mobile metrological groups to verify measuring instruments in territorial bodies of the EMERCOM of Russia, taking into account travel time restrictions. The proposed methodology is based on the combined use of several methods, such as the “greedy method” and the “simulated annealing method”, as well as the introduction of a number of additional variables and restrictions that take into account the time of verification and other work. The combined application of these methods for optimizing transport tasks makes it possible to solve the problem with a large number of territorial bodies and

institutions of the EMERCOM of Russia, with minimal expenditure of resources on calculations, and obtaining the most profitable route. The time allocated for a business trip, as well as a number of other restrictions, allowed made it possible to obtain the most accurate data for building routes for traveling metrological groups. The application of the developed methodology significantly reduces the total distance traveled and the number of business trips.

Keywords: measuring instrument, verification, transport task, method of branches and boundaries, dynamic programming, annealing method, optimization, territorial bodies of the EMERCOM of Russia

For Citation: Lyubkinh R. N. Methodology for optimizing the routes of the visiting metrological groups of the EMERCOM of Russia // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 82–92.

Введение

В МЧС России применяют большое количество средств измерений (далее — СИ) военного и специального назначения различных видов. Согласно Федеральному закону от 26.06.2008 № 102-ФЗ все СИ, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежат первичной, а в процессе эксплуатации — периодической, как правило один раз в год поверке [1]. По этой причине все подразделения, эксплуатирующие СИ, обязаны своевременно предоставлять их на поверку. При этом на время изъятия СИ на поверку соответствующее оборудование не способно выполнять поставленные задачи, в результате чего падает готовность подразделения к выполнению своих задач.

Для проведения поверки СИ в МЧС России была создана метрологическая служба МЧС России, головным подразделением которой является ФКУ «ЦБИТ МЧС России» (далее — ЦБИТ). Эта структура отвечает за планирование и проведение метрологического обслуживания территориальных органов и учреждений МЧС России.

Для уменьшения времени поверки практически все СИ давления и вакуума

(что составляет 80 % от общего объема СИ, используемых в МЧС России) поверяют выездные метрологические группы с помощью подвижной метрологической лаборатории (далее — ПМЛ) в подразделениях, где их эксплуатируют.

Для проведения поверки СИ давления и вакуума с помощью ПМЛ в ЦБИТ составляют план командировок выездных метрологических групп. В нем указывают подразделения МЧС России, в которых требуется проведение поверки СИ, количество поверителей и длительность командировок.

В настоящее время командировку выездной метрологической группы формируют таким образом, чтобы длительность командировки составляла не более десяти рабочих дней. Выбирают направление к какому-либо наиболее удаленному территориальному органу МЧС России, где необходимо поверить СИ, и уже по пути движения к этому территориальному органу добавляют подразделения МЧС России, находящиеся в относительной близости от маршрута движения. К примеру, в плане командировок выездных групп на 2023 г. было запланировано 20 командировок, в которых необходимо было посетить 48 территориальных органов и учреждений МЧС России для проведения поверки СИ. Суммарный путь дви-

жения составил 8 640 км. Текущий способ составления плана командировок выездных групп и маршрута движения ПМЛ формируют на основе накопленного опыта проведения проверок СИ в учреждениях МЧС России, что, в свою очередь, не всегда является экономически целесообразным из-за неоправданно больших затрат на пройденный маршрут.

Для уменьшения времени нахождения СИ на проверке, а также уменьшения экономических затрат в результате сокращения

времени движения ПМЛ, необходима оптимизация маршрута движения ПМЛ. Это, в свою очередь, помимо снижения экономических затрат на прохождение маршрута (расходы на топливо, амортизацию автотранспорта и др.), которые находят по формуле (1), приведет к повышению уровня готовности территориальных органов к выполнению задач по предназначению в связи с уменьшением времени простоя оборудования, эксплуатирующего СИ, нуждающегося в проведении проверки.

$$Z = rSC + A_a, \quad (1)$$

где:

Z — экономические затраты, руб.;

r — расход топлива ПМЛ, л/км;

S — пройденный путь, км;

C — цена литра топлива, руб.;

A_a — амортизация автомобиля, руб.

Для оптимизации маршрутов движения выездных метрологических групп необходимо решить частный случай задачи линейного программирования. Подобные примеры представляют задачу коммивояжера, которая заключается в том, что при движении от места старта необходимо пройти все точки и вернуться назад, при этом посетив точку только один раз [2].

В работе [3] был предложен способ оптимизации маршрута движения выездной метрологической службы. В ней вопрос построения маршрута решается через задачу коммивояжера в классическом исполнении с применением метода ветвей и границ. Такой способ позволяет решать задачу только при малом количестве точек. При наличии более десяти точек этот метод не применим, т. к. получается очень большое время вычислений, а также, если в приведенной

матрице будут несколько одинаковых значений, задача не будет иметь решения.

В нашем случае для оптимизации маршрута движения ПМЛ нельзя применить задачу коммивояжера в ее классическом виде в связи с тем, что величина круга имеет ограничение в виде количества дней, отведенных на командировку. После смены экипажа и проведения технического обслуживания ПМЛ отправляется в командировку по оставшимся непройденным точкам. Таким образом получается несколько циклов, имеющих ограничения (к примеру, по времени нахождения автомобиля на маршруте), и нам необходимо найти минимальный путь прохождения всех точек.

Для оптимизации маршрута движения с учетом ограничения времени на командировку необходимо решить частную задачу линейного программирования.

Постановка задачи

Пусть n — количество территориальных органов и учреждений МЧС России с координатами x , где необходимо произвести

поверку СИ с применением выездной метрологической группы. Известны расстояния между данными подразделениями. ПМЛ, выезжая из места старта x_0 (ЦБИТ), группа должна посетить все подразделения, побывав в каждом не более одного раза, и вернуться в исходную точку. Время нахождения ПМЛ в командировке ограничено временем β дней, по истечении которого ПМЛ должна вернуться в место старта и далее опять от-

правиться на поверку СИ в оставшиеся подразделения с учетом ограничения β (дней). Расстояние между территориальными органами и учреждениями МЧС России x_i и x_{i+1} — $S_{i,i+1}$, V — скорость движения ПМЛ, t_{nn} — время на проведение поверки СИ, а также другие неотложные работы.

Необходимо построить маршрут движения таким образом, чтобы суммарный пройденный путь S ПМЛ стремился к минимуму:

$$S = f(n, \beta, t_{nn}, \sum_{i=0}^n S_{i,i+1}, V) \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\sum S_{i,i+1}$$

при следующих ограничениях:

- время командировки: $\beta \geq 14$ дней;
- время работы выездной метрологической группы составляет 8 часов в сутки;
- скорость движения ПМЛ $V \leq 90$ км/ч.

Для оптимизации маршрута движения выездной метрологической группы наиболее оптимальным вариантом будет совместное применение нескольких методик.

Применение жадного метода позволяет сделать выбор, который выглядит наилучшим на текущем шаге, без учета последствий этого выбора в будущем. Метод позволяет сделать локально оптимальный выбор в надежде, что он приведет к глобальному оптимальному решению. Жадные алгоритмы обычно просты в понимании, реализации и требуют наименьшего времени на вычисления.

У этого метода есть существенный недостаток. Качество решения напрямую зависит от выбора критерия жадности. Неверный критерий может привести к плохому решению. Для устранения этого недостатка был дополнительно использован метод имитации отжига. Выбранный метод оптимизации аналогичен процессу отжига металлов. Его используют для поиска (квази-)оптимального решения в задачах оптимизации, где

пространство поиска велико и может содержать множество локальных оптимумов. Он способен выходить из локальных оптимумов благодаря вероятности принятия «плохих» решений, что позволяет ему искать глобальный оптимум. Этот алгоритм основан на имитации процесса образования кристаллической структуры в веществе. Имитируя такой процесс, находят глобальный экстремум целевой функции [7, 8]. Метод имитации отжига является вероятностным и не дает точных результатов, поэтому они могут варьироваться от одного расчета к другому. Данный метод требует длительного времени работы, особенно в задачах с высоким уровнем сложности и сложным пространством поиска.

Совместное применение данных методов позволяет нивелировать недостатки обоих методов.

Решение задачи

Методика решения включает в себя следующие этапы:

1. Построение матрицы расстояний между всеми точками посещения выездной метрологической группы (S_{11} место старта):

$$C = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2. При менее десяти объектов, для оптимизации обычно используют метод ветвей и границ. Этот метод описан в работе [3], но, как уже было ранее приведено, при большом количестве объектов указанный метод не подходит. Для эффективной маршрутизации с большим количеством объектов используем жадный метод, который отли-

чается высокой эффективностью в поиске оптимальных решений для сложных задач и нахождении кратчайших путей к их решению [5].

При проектировании маршрута движения первоначально матрицу расстояний переводим во время, которое необходимо затратить ПМЛ для преодоления расстояния S между точками:

$$t = \frac{S}{V}, \quad (4)$$

где:

Z — экономические затраты, руб.;

r — расход топлива ПМЛ, л/км;

S — пройденный путь, км;

C — цена литра топлива, руб.;

A_a — амортизация автомобиля, руб.

3. От места старта x_0 (ЦБИТ) выбираем в матрице расстояний ближайшую к ней точку x_1 , затем уже от нее выбираем следующую ближайшую точку x_2 из оставшихся. Так строим цепочку, пока не будут пройдены все точки.

x_0	x_1	x_2	...	x_n
S_{11}	S_{12}	S_{13}	...	S_{1n}
S_{21}	S_{22}	S_{23}	...	S_{2n}
...	...	...	...	...
S_{n1}	S_{n2}	S_{n3}	...	S_{nn}

4. После прохождения последней точки x_n возвращаемся в точку старта x_0 . Таким образом получаем очередность посещения точек $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_n \rightarrow x_0$ и оптимальный маршрут движения с минимальным временем [6] без учета ограничений.

5. В связи с тем, что полученная цепочка посещения $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_n \rightarrow x_0$, построенная с применением жадного метода, хоть и является минимальным значением, но может быть еще опти-

мизирована путем применения метода имитации отжига.

Оптимизация маршрута передвижения ПМЛ методом имитации отжига

Основные параметры, применяемые в методе имитации отжига:

Энергия системы (E) — это функция, которую мы хотим минимизировать. В нашем случае это длина маршрута.

Начальная температура (T) — параметр, представляющий величину принятия рассматриваемых решений.

Выбираем высокую начальную температуру, чтобы увеличить пространство (количество) решений. По мере выполнения алгоритма температура постепенно понижается, что сужает поиски решения и позволяет прийти к оптимальному решению.

Параметры охлаждения — скорость снижения температуры.

5.1. «Инициализация».

Задаем начальное состояние (первоначальный маршрут движения). Для этого берется цепочка посещения, построенная жадным методом, $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_n \rightarrow x_0$.

– если $\Delta E < 0$, то новый путь лучше, и его принимаем за начальный. Алгоритм всегда стремится к уменьшению маршрута S ;

где:

P — вероятность принятия данного пути;

- при высокой температуре даже пути с большим ΔE принимают с высокой вероятностью P . По мере снижения температуры вероятность принятия худших путей уменьшается. Это позволяет алгоритму «выбираться» из локальных минимумов;
- цикл генерации нового маршрута и принятия решения повторяется для каждой температуры определенное количество раз N итераций.

На протяжении расчетов проводим «охлаждение», понижая температуру с использованием коэффициента ω ($\omega < 1$). $T = \omega T$.

Расчет заканчивается, когда достигается один из критериев:

5.2. «Итерационный цикл»:

- на основе найденного жадным методом маршрута, создается новый путем внесения небольших случайных изменений за счет перестановки точек в цепочке, либо изменением положения точки в цепочке (в произвольном порядке меняется очередность точек в цепочке);
- вычисляем изменение энергии (ΔE), которое равно разнице длины пути между начальной и новой (полученной) цепочкой:
- определяем, принимаем ли новый путь как начальный:

$$\Delta E = S_{\text{нов}} - S_{\text{нач}}; \quad (5)$$

– если $\Delta E \geq 0$, то новый путь хуже, и его используем для дальнейшего расчета с вероятностью, определяемой формулой:

$$P = \exp(-\Delta E / T), \quad (6)$$

- температура достигла минимального данного значения;
- не было улучшений в решении за определенное количество итераций;
- достигнуто максимальное количество итераций.

По окончании расчетов выбираем минимальное значение S , которое является оптимальным маршрутом.

Таким образом, применение жадного метода совместно с методом имитации отжига позволяет построить маршрут движения выездных метрологических групп и оптимизировать его.

6. После того как из всех имеющихся точек построен и оптимизирован маршрут движения, формируем командировки с учетом заданного ограничения β .

Получившуюся цепочку расстояний $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_n \rightarrow x_0$ преобразуем в цепочку времени, затраченного на прохождение заданных точек ($t_{об}$): $t_{об} = t_{x_0x_1} + t_{x_1x_2} + \dots + t_{x_{n-1}x_n} + t_{x_nx_0}$.

7. Для получения данных маршрута движения ПМЛ с учетом количества командировок необходимо учитывать время, затрачиваемое на поверку СИ.

По этой причине предлагается введение дополнительной переменной t_n — времени поверки, которое представляет собой сумму времени собственно проведения поверки СИ и времени на иные работы (t_c), такие как оформление документов и прочее, для получения более точных данных.

Тогда:

$$t_n = t_{пСИ} + t_c. \quad (7)$$

В результате чего определяем общее время командировки $t_{об}$:

$$t_{об} = \sum_{i=1}^n t_{x(n-1)x_n} + \sum_{i=1}^n t_{пн}. \quad (8)$$

Выездная метрологическая группа, согласно закону о труде, работает 8 часов в сутки. Тогда количество дней, которое

необходимо на проведение поверки СИ в территориальных органах и учреждениях МЧС России, будет равно:

$$t_{об} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{x(n-1)x_n} + \sum_{i=1}^n t_{пн}}{8}. \quad (9)$$

8. С учетом полученных данных формируем круги, т. е. часть всего маршрута (командировки) с учетом ограничения времени на круг (командировку). При формировании круга командировки необходимо, чтобы $t_{кр} \leq \beta$.

Круг командировки формируем следующим образом. Ко времени прохождения пути от места старта до первой точки $t_{x_0x_1}$ и времени проведения поверки СИ в первой точке прибавляем затрачиваемое время на обратный путь и сравниваем с ограничением β . Если получившееся время максимально близко к ограничению, то эта цепочка

формирует первый круг (командировку), ПМЛ возвращается в точку старта, и затем строим новый круг. После этого из оставшихся точек проводим расчеты согласно пунктам методики 1–7. Если $t_{кр}$ значительно меньше ограничения, то к затрачиваемому времени от места старта до первой точки прибавляем затрачиваемое время между первой и второй точкой плюс прибавляем время от второй точки до места старта и получившееся время сравниваем с ограничением. Таким образом формируем цепочку прохождения из i точек с условием ограничения:

$$(t_{x_0x_1} + t_{п1} + t_{x_1x_2} + t_{п2} + \dots + t_{x_{i-1}x_i} + t_{пi} + t_{x_ix_0})/8 \leq \beta, \quad (10)$$

ИЛИ

$$\frac{\sum_{i=1}^i t_{x(i-1)x_i} + \sum_{i=1}^i t_{пi}}{8} \leq \beta. \quad (11)$$

9. После формирования первого круга из оставшихся точек заново выполнением пункты 1–7 до тех пор, пока все точки маршрута не будут включены в командировки.

Такая методика также позволяет оптимизировать маршрут движения любого транспорта, которому необходимо посетить определенные объекты с целью выполнения определенных задач и вернуться на место старта, имея ограничения по времени на круг (командировку).

Для реализации предложенной методики оптимизации маршрута движения выездных метрологических групп МЧС России был взят план командировок выездных метрологических групп ЦБИТ на 2023 г. В связи с тем, что в выбранном плане командировок имеется большое количество данных, была разработана программа для ЭВМ, ко-

торая позволила оптимизировать маршрут движения ПМЛ.

Таким образом, с помощью предложенной методики с учетом принятых ограничений и переменных, а также разработанной на этой основе программы для ЭВМ [9], удалось уменьшить длину маршрута движения *S* выездной метрологической группы с 8 640 до 6 650 км и уменьшить количество командировок за год в четыре раза (с 20 до 5) (см. рис.).

Разработанная методика получила реализацию в виде применения программы для ЭВМ «Программа расчета рационального маршрута подвижной метрологической лаборатории при составлении плана командировок выездных метрологических групп» [9] для ЦБИТ МЧС России. В результате чего были внесены изменения в план командировок выездных групп на 2026 г.

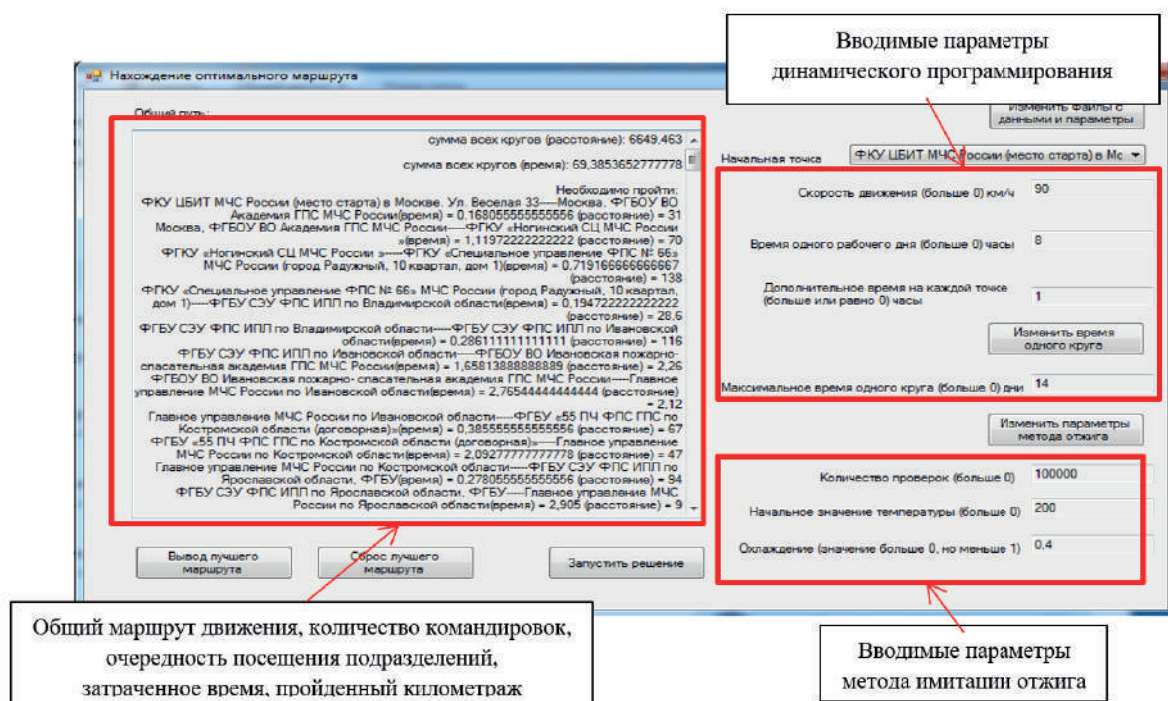


Рис. Интерфейс программы расчета маршрута движения и количества командировок для ПМЛ с учетом времени, затраченного на поверку СИ

Fig. The interface of the program for calculating the route and the number of business trips for the PML, taking into account the time spent on checking the measuring instruments

Выводы

1. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью снижения как экономических, так и временных затрат на проведение поверки СИ с помощью выездных метрологических групп для увеличения готовности подразделений МЧС России к выполнению ими своих функций.
2. Предложена математическая модель постановки задачи минимизации времени поверки СИ ПМЛ, что повысит готовность подразделений МЧС России к выполнению своих задач.
3. Разработана и предложена комплексная методика построения маршрута движения выездных метрологических групп МЧС России в условиях ограничения времени их нахождения в командировках,

закрывающаяся в последовательном применении двух методик — жадного метода и имитации отжига, — а также ряда дополнительных ограничений.

4. На основе предложенной методики была разработана программа для ЭВМ, и с ее помощью оптимизирован маршрут движения ПМЛ для проведения поверки СИ в территориальных органах МЧС России, в результате чего построенный маршрут был уменьшен с 8 640 до 6 500 км (на 25 %), а количество командировок сокращено с 20 до 5 (в четыре раза).

5. Предложенную методику можно использовать и в других транспортных задачах с другими переменными, где есть необходимость рассчитать минимальные затраты при принятых ограничениях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об обеспечении единства измерений : Федер. закон № 102-ФЗ : принят Государственной Думой 11.07.2008 : одобрен Советом Федерации 18.06.2008 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (дата обращения: 11.02.2025).
2. Задача коммивояжера. Метод ветвей и границ // Studfiles : сайт. URL: <https://studfile.net/preview/3298745/page:19/> (дата обращения: 10.02.2025).
3. Ершова К. А. Задача оптимизации маршрута движения выездной метрологической группы // Вестник науки. 2023. № 1 (58), Т. 2. С. 236–245.
4. Галяутдинов Р. Р. Задача коммивояжера — метод ветвей и границ // Галяутдинов.ру : сайт. URL: <https://galyautdinov.ru/post/zadacha-kommivoyazhera> (дата обращения: 22.03.2025).
5. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология : учеб. пособие. М., 1988. 208 с.
6. Жадные алгоритмы и динамическое программирование // Studfiles : сайт. URL: <https://studfile.net/preview/915308/page:52/> (дата обращения: 24.11.2024).
7. Алгоритм имитации отжига // РУВИКИ : сайт. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Алгоритм_имитации_отжига (дата обращения: 24.03.2025).

8. Метод отжига // Алгоритмика : сайт. URL: <https://algorithmica.org/ru/annealing> (дата обращения: 24.03.2025).

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619871 Российская Федерация. Программа расчета рационального маршрута подвижной метрологической лаборатории при составлении плана командировок выездных метрологических групп : № 2024692343 : заявл. 25.12.2024 : опубл. (зарег.) 18.04.2025 / Р. Н. Любкин [и др.] ; заявитель АГЗ МЧС России.

REFERENCES

1. On Ensuring the Uniformity of Measurements : Federal Law № 102-FZ adopted by the State Duma on 11.07.2008 : approved by the Federation Council on 18.06.2008 // ConsultantPlus. URL: <https://clck.ru/3P8Yo5> (date of application: 02.03.2025).

2. The traveling salesman's task. The «branches and borders» method // Studfiles : website. URL: <https://studfile.net/preview/3298745/page:19/> (date of application: 10.02.2025).

3. Yershova K. A. The task of optimizing the route of the on-site metrological group // BULLETIN OF SCIENCE. 2023. № 1 (58), vol. 2. pp. 236–245.

4. Galyautdinov R. R. The traveling salesman's task — the method of branches and boundaries // Economics teacher's : website. URL: <https://galyautdinov.ru/post/zadacha-kommivoyazhera> (date of application: 22.03.2025).

5. Ventzel E. S. Operations research: tasks, principles, methodology : textbook for university students. M., 1988. 208 p.

6. Greedy algorithms and dynamic programming // Studfiles : website. URL: <https://studfile.net/preview/915308/page:52/> (date of application: 24.11.2024).

7. The algorithm of simulated annealing // RUWIKI : website. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Алгоритм_имитации_отжига (date of application: 24.03.2025).

8. Annealing method // Algorithmics : [website]. URL: <https://algorithmica.org/ru/annealing> (date of application: 24.03.2025).

9. Certificate of state registration of the computer program No. 2025619871 Russian Federation. The program for calculating the rational route of a mobile metrological laboratory when drawing up a business trip plan for visiting metrological groups : № 2024692343 : application dated 25.12.2024 : published on 18.04.2025 / R. N. Lyubkin et al. ; applicant AGZ of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman N. Lyubkin, Lecturer of the Department of the Exploitation of Transport-technological Machines and Complexes Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str., Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 17.06.2025
Одобрена после рецензирования 02.07.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 351.862.216.2, 614.8

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ ЗАЩИТНЫХ ДАМБ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ

Ткаченко Юлия Анатольевна, Тимарин Алексей Николаевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности строительства временных защитных дамб при ликвидации последствий паводковых наводнений. Особое внимание уделяется анализу организационно-технологических аспектов проведения аварийно-спасательных работ и других неотложных работ с применением методов параллельного выполнения операций. Авторами проведено комплексное исследование, включающее практические эксперименты по определению временных затрат на различных этапах возведения защитных сооружений (дамб). Результаты исследования демонстрируют существование принципиальных ограничений в сокращении сроков выполнения работ даже при значительном увеличении количества задействованного личного состава. Это обусловлено наличием обязательных последовательных операций, которые невозможно распараллелить. В работе предложен инновационный подход к планированию спасательных операций, основанный на применении современных алгоритмов распределения задач и оптимизации рабочих процессов. Особую ценность представляет разработанная методика расчета временных параметров, учитывающая как технологические особенности строительства защитных сооружений, так и организационные аспекты управления спасательными формированиями. Полученные выводы имеют важное практическое значение для совершенствования системы реагирования на паводковые угрозы и могут быть использованы при обновлении нормативно-методической базы в области защиты населения и территории от наводнений.

Ключевые слова: наводнения, параллельные методы, теория расписаний, оптимизация процессов

Для цитирования: Ткаченко Ю. А., Тимарин А. Н. Подходы к оптимизации временных показателей при строительстве быстровозводимых защитных дамб методом параллельного выполнения задач // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 92–98.

APPROACHES TO OPTIMIZING TIME INDICATORS IN THE CONSTRUCTION OF FAST-MOVING PROTECTIVE DAMS BY PARALLEL TASK EXECUTION

Yulia A. Tkachenko, Aleksey N. Timarin
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. This article examines current issues related to improving the efficiency of constructing temporary protective dams during flood response operations. Particular attention is given to analyzing organizational and technological aspects of conducting emergency rescue and other urgent operations using parallel processing methods. The authors conducted comprehensive research involving practical experiments to determine time requirements for various stages of protective structure (dam) constructions. The research results demonstrate fundamental limitations in reducing operational timelines even with significant increases in personnel numbers. This is due to the presence of essential sequential operations that cannot be parallelized. The study proposes an innovative approach to planning rescue operations, based on modern task distribution algorithms and work process optimization. Of particular value is the developed methodology for calculating time parameters, which considers both technological features of protective structure construction and organizational aspects of rescue team management. The findings have significant practical implications for improving flood response systems and can be used to update regulatory and methodological frameworks in the field of population and territory protection against floods.

Keywords: floods, parallel methods, schedule theory, process optimization

For Citation: Tkachenko Yu. A., Timarin A. N. Approaches to optimizing time indicators in the construction of fast-moving protective dams by parallel task execution // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 92–98.

Введение

Последние годы были отмечены рядом чрезвычайных ситуаций, продемонстрировавших, что практика градостроительной деятельности зачастую осуществляется без должного соблюдения стандартов и нормативных актов, направленных на обеспечение безопасности населения, объектов инфраструктуры и прилегающих районов от наводнений [1].

Между тем от паводковых наводнений в настоящее время наблюдается наибольший ущерб. Меры, предпринимаемые для подготовки и сопровождения паводкового сезона с целью минимизации потенциальных рисков, разделяются на два основных типа: заблаговременные меры и оперативные меры [2, 3].

Основная часть

Проведенный анализ существующего научно-методического аппарата в части планирования и обоснования мероприятий минимизации потенциальных рисков в период паводкоопасного сезона показал, что они сосредоточены на проблемах мониторинга и прогнозирования паводковой ситуации [4–6], тогда как аспекты оперативного реагирования зачастую остаются вне поле зрения.

В то же время существует потребность в обеспечении реализации комплексного подхода, учитывающего тесную взаимосвязь между мерами как профилактического, так и оперативного характера. В ряде исследований, направленных на изучение процесса развития наводнений [6–8], отмечается, что точный и своевременно предоставляемый

прогноз позволяет заранее планировать мероприятия для защиты населения и территорий, подверженных риску затопления.

Эти мероприятия должны разрабатываться и реализовываться с учетом частотности возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных паводковыми явлениями, их источниками, прогнозируемого экономического ущерба на основании статистической информации, а также возможностей задействованных группировок сил и средств для предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В данной работе предлагается учесть влияние на величину ущерба такого фактора, как производительность личного состава и применяемых аварийно-спасательных ресурсов при выполнении оперативных мероприятий минимизации потенциальных рисков в паводкоопасный сезон.

Однако стоит отметить, что ранее действующие методики [9, 10] потеряли свою юридическую силу и не отражали изменений в технологиях осуществления оперативных мер по защите от наводнений и возможностей современного спасательного оборудования. Более того, методика [10] не включает оценку трудовых затрат на строительство быстро возводимых защитных дамб, а соответствующие нормы не закреплены нормативными правовыми актами.

В исследовании [11], посвященном анализу результатов натурного эксперимента, были определены временные показатели, характеризующие возможности группировки сил и средств при строительстве быстро возводимых временных защитных дамб. В ходе эксперимента производилась оценка трудозатрат на различных этапах работ при возведении водозащитных дамб. Полученные данные позволили собрать эм-

пирическую базу для формирования нормативов временных затрат при проведении оперативных мероприятий для минимизации площади зон затопления возведением водозащитных дамб.

В результате эксперимента были получены следующие результаты, которые могут быть использованы для обновления нормативных документов и создания методик:

- время, затраченное на заполнение 30 мешков песком: вариант 1 (совковая лопата) — 27 минут, вариант 2 (штыковая лопата) — 31 минута;
- перенос мешков на 20 метров вручную: один спасатель — 15 минут, два спасателя — 7–8 минут;
- перенос мешков на 40 метров вручную: один спасатель — 30 минут, два спасателя — 15 минут;
- возведение дамбы в один ряд: один спасатель — 27 минут, два спасателя — 14 минут;
- возведение дамбы в два ряда: один спасатель — 54 минуты, два спасателя — 28 минут.

Тогда можно предположить, что при подходе параллельных работ время сократится пропорционально количеству людей, т. е. при проведении практического эксперимента с параллельным проведением работ с количеством участников 20, переносом мешков на 40 метров вручную, возведение дамбы в два ряда, время на выполнение работ должно сократиться в 20 раз. Однако в реальности это заняло 10,83 минуты. Другими словами, ускорение выполнения всех видов работ произошло не пропорционально количеству человек, а приблизительно в 10,25 раз.

В теории параллельных вычислений существует противоречие между ожидаемым

ускорением процесса за счет увеличения числа участников и ограничениями, накладываемыми законом Амдала [12]. Это противоречие проявляется в следующих аспектах:

- теоретически увеличение числа участников, выполняющих задачи параллельно, должно пропорционально сокращать время на выполнение работы.

В нашем случае ожидаемое время выполнения работ должно составлять около 5,5 минут;

- закон Амдала [13] утверждает, что ускорение процесса ограничено долей последовательных операций (α), которые не могут быть распараллелены.

Формула ускорения (1):

$$S_p = \frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{p}}, \quad (1)$$

где:

S — ускорение;

p — число участников;

α — доля последовательных операций.

Если $\alpha > 0$, то ускорение не может превышать $1/\alpha$, независимо от количества участников.

В реальных условиях при увеличении числа участников время выполнения работ не сократилось пропорционально из-за необходимости координации, распределения людей и наличия последовательных этапов.

Отсюда вытекает противоречие: с одной стороны, теория параллельных вычислений предполагает, что увеличение числа участников должно пропорционально сокращать время выполнения задач; с другой стороны, закон Амдала указывает на фундаментальное ограничение увеличения производительности из-за наличия последовательных операций. Это создает противоречие между ожидаемым результатом и реальными показателями производительности процесса возведения водозащитных дамб (2)–(6):

$$10,25 = \frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{20}}. \quad (2)$$

$$\alpha + \frac{1-\alpha}{20} = \frac{1}{10,25}. \quad (3)$$

$$\alpha + 0,05 - 0,05\alpha = 0,0976. \quad (4)$$

$$0,95\alpha = 0,00024. \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{0,00024}{0,95} \approx 0,05. \quad (6)$$

Противоречие между ожидаемым повышением производительности группировки за счет увеличения числа участников и ограничениями закона Амдала подчеркивает не-

обходимость учета доли последовательных операций при планировании параллельных процессов, т. к. расчетная доля последовательных операций составляет $\alpha \approx 0,05$, это

показывает, что примерно 5 % работ не могут быть распараллелены.

Выводы

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что противоречие между ожидаемым увеличением производительности при увеличении числа участников и ограничениями закона Амдала можно решить с помощью методов теории расписаний, которые позволяют оптимизировать распределение задач и минимизировать влияние последовательных операций.

Тогда целью будет являться такое распределение задач между участниками, что-

бы общее время выполнения работ было минимальным.

Для этого в качестве методов предлагаются к использованию «жадные алгоритмы», которые позволят распределить задачи на основе текущей загрузки участников, «алгоритмы балансировки нагрузки», которые позволят равномерно распределить задач для минимизации простоев. Последовательные операции могут быть выделены в отдельные этапы и оптимизированы по отдельности путем разбиения задачи на подзадачи, которые могут выполняться независимо. Таким образом, теория расписаний позволит минимизировать долю последовательных операций за счет оптимизации распределения задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Масштабы и опасность наводнений в регионах России / В. В. Разумов [и др.]. М., 2018. 364 с.
2. Вакорин М. В., Письменский Н. В., Ткаченко П. Н. Постановка научной задачи обоснования рационального комплекса мероприятий для снижения ущерба от наводнений на реках со снежным типом формирования речного стока // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. № 4 (43). С. 63–71.
3. Григоренко П. А., Ткаченко П. Н. Предупредительные мероприятия по обеспечению безопасности людей на водных объектах // Совершенствование единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны Российской Федерации на современном этапе : сб. трудов XXX Международной научно-практической конференции / науч. ред. П. Н. Ткаченко, Н. В. Письменский. Химки, 2020. С. 40–44.
4. Добровольский С. Г., Истомина М. Н. К разработке концепции «управления ущербами» от наводнений в Российской Федерации // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2016. Т. 6, № 1 (10). С. 30–36.
5. Анализ научно-методических подходов к прогнозированию заторных явлений в Томской области / Ю. А. Ткаченко [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (53). С. 29–37.
6. О модели прогнозирования подъема уровня паводковых вод, вызванных весенним половодьем, на основе анализа больших данных / А. В. Рыбаков [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 48–57.

7. Structural flood-protection measures referring to several European case studies / S. Schnabl et al. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. № 14. pp. 135–142.
8. Анализ проблемной ситуации повышения готовности муниципальных образований к защите от наводнений / С. А. Морозов [и др.] // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 2 (45). С. 104–109.
9. Наставление по организации и технологии ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ при чрезвычайных ситуациях. Часть 3. Организация и технология ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ при наводнениях и катастрофических затоплениях. М., 2001. 165 с.
10. Методика расчета средств для выполнения аварийно-спасательных и других неотложных работ при наводнениях и катастрофических затоплениях // Судебные и нормативные акты РФ : сайт. URL: <https://clck.ru/3NtJpN> (дата обращения: 26.03.2025).
11. Результаты натурного эксперимента по определению временных показателей при сооружении быстровозводимых временных защитных дамб / Е. В. Иванов [и др.] // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 4 (63). С. 54–64.
12. Hennessy J. L., Patterson D. A. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. San Francisco, 2017. 936 p.
13. Gustafson J. L. Reevaluating Amdahl's Law // *Communications of the ACM*. 1988. Vol. 31, № 5. pp. 532–533.

REFERENCES

1. Scale and Danger of Floods in Russian Regions / V. V. Razumov et al. М., 2018. 364 p.
2. Vakorin M. V., Pismenskiy N. V., Tkachenko P. N. Formulating the Scientific Problem of Substantiating Rational Measures to Reduce Flood Damage in Rivers with Snowmelt-Driven Runoff Formation // *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2019. № 4 (43). pp. 63–71.
3. Grigorenko P. A., Tkachenko P. N. Preventive Measures to Ensure Safety on Water Bodies // *Improving the Unified State System of Emergency Prevention and Response and Civil Defense of the Russian Federation at the Present Stage : proceedings of the XXX International Scientific-Practical Conference*. Khimki, 2020. pp. 40–44.
4. Dobrovolsky S. G., Istomina M. N. Towards Developing a Concept of «Damage Management» from Floods in the Russian Federation // *Civil Protection Strategy: Problems and Research*. 2016. Vol. 6, № 1 (10). pp. 30–36.
5. Analysis of Scientific-Methodological Approaches to Forecasting Ice Jam Phenomena in Tomsk Region / Yu. A. Tkachenko et al. // *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2022. № 2 (53). pp. 29–37.
6. On a Model for Forecasting Flood Water Level Rise Caused by Spring Floods Based on Big Data Analysis / A. V. Rybakov et al. // *Modern Problems of Civil Protection*. 2022. № 4 (45). pp. 48–57.
7. Structural flood-protection measures referring to several European case studies / S. Schnabl et al. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. № 14. pp. 135–142.

8. Analysis of Problematic Situation in Improving Municipal Readiness for Flood Protection / S. A. Morozov et al. // Scientific and Educational Problems of Civil Protection. 2020. № 2 (45). pp. 104–109.

9. Manual on Organization and Technology of Emergency Rescue and Other Urgent Works During Emergencies. Part 3. Organization and Technology of Emergency Rescue and Other Urgent Works During Floods and Catastrophic Inundations. M., 2001. 165 p.

10. Methodology for Calculating Resources Needed for Emergency Rescue and Other Urgent Works During Floods and Catastrophic Inundations. URL: <https://clck.ru/3NtJpN> (date of application: 26.03.2025).

11. Results of Field Experiment on Determining Time Parameters for Rapid Construction of Temporary Protective Dams / E. V. Ivanov et al. // Scientific and Educational Problems of Civil Protection. 2024. № 4 (63). pp. 54–64.

12. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. San Francisco, 2017. 936 p.

13. Gustafson J. L. Reevaluating Amdahl's Law // Communications of the ACM. 1988. Vol. 31, № 5. pp. 532–533.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ткаченко Юлия Анатольевна, канд. техн. наук, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 1100141; e-mail: yu.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru

Тимарин Алексей Николаевич, соискатель ученой степени канд. техн. наук преподаватель кафедры оперативного управления мероприятиями РСЧС и ГО Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 1111605; e-mail: a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia A. Tkachenko, Cand.Sci. (Eng.), junior researcher at the Research Department, Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia (Sokolovskaya, 1A, Khimki, 141435 Russian Federation); ID RISC: 1100141; e-mail: yu.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru

Aleksey N. Timarin, Candidate of Sciences (PhD equivalent) in Engineering, lecturer of the Department (Operational Management of Emergency Situations and Civil Defense), Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia (Sokolovskaya, 1A, Khimki, 141435 Russian Federation); ID RISC: 1111605; e-mail: a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru

Поступила в редакцию 14.04.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.8

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИБОРОВ ПОИСКА

Веселов Алексей Вячеславович¹, Давыдов Роман Михайлович¹, Кузьмин Александр Викторович²

¹ Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу технических средств, используемых для поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях, вызванных разрушением зданий и сооружений. В работе акцентировано внимание на ключевых факторах, определяющих эффективность поисково-спасательных работ, таких как временные рамки, точность идентификации пострадавших, устойчивость оборудования к чрезвычайным условиям и возможность интеграции с другими системами. Проведен детальный обзор современных технических средств поиска, включая акустические, тепловизионные и радиолокационные системы, применяемые в условиях чрезвычайных ситуаций. В настоящей статье предложена комплексная методика, позволяющая решить взаимосвязанные задачи: определить рациональный перечень параметров для оценки технических средств поиска пострадавших; определить весовые коэффициенты выбранных параметров оценки; повысить эффективность на этапе проектирования и разработки, и использования технических средств поиска пострадавших в условиях разрушений зданий и сооружений. Представленный научно-методический аппарат позволяет решить оптимизационную задачу обоснования рациональных параметров комплексной оценки эффективности технических средств поиска, а его реализация — обеспечить максимизацию эффективности проведения поисково-спасательных работ с использованием технических средств поиска.

Ключевые слова: поисково-спасательные работы, приборы поиска пострадавших, эффективность, акустические приборы, оптические приборы, радиолокационные приборы, модель комплексной оценки эффективности технических средств поиска пострадавших

Для цитирования: Веселов А. В., Давыдов Р. М., Кузьмин А. В. Комплексная методика оценки эффективности приборов поиска // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 99–113.

COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF SEARCH DEVICES

Alexey V. Veselov¹, Roman M. Davydov¹, Alexander V. Kuzmin²

¹ Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of the technical means used to search for victims in emergency situations caused by the destruction of buildings and structures. The paper focuses on key factors determining the effectiveness of search and rescue operations, such as time frames, accuracy of victim identification, resilience of equipment to emergency conditions, and the ability to integrate with other systems. A detailed review of modern technical search tools, including acoustic, thermal imaging and radar systems used in emergency situations is conducted. This article proposes a comprehensive methodology that allows solving interrelated tasks: to determine a rational list of parameters for evaluating technical means of searching for victims; to determine the weighting coefficients of selected evaluation parameters; to increase efficiency at the design and development stage, and the use of technical means of searching for victims in the conditions of destruction of buildings and structures. The presented scientific and methodological apparatus allows solving the optimization problem of substantiating the rational parameters of a comprehensive assessment of the effectiveness of technical search equipment and its implementation ensures maximization of the effectiveness of search and rescue operations using technical search equipment.

Keywords: search and rescue operations, victim search devices, efficiency, acoustic devices, optical devices, radar devices, a model for a comprehensive assessment of the effectiveness of victim search equipment

For Citation: Veselov A. V., Davydov R. M., Kuzmin A. V. Comprehensive methodology for evaluating the effectiveness of search devices // *Technospheric safety*. 2025. № 3 (48). pp. 99–113.

Введение

Чрезвычайные ситуации занимают значимое место в истории человечества, выступая в качестве факторов, приводящих к человеческим жертвам, разрушению материальных и культурных ценностей, а также к значительным социально-экономическим последствиям. По своей природе возникновения чрезвычайные ситуации классифицируются на природные (обусловленные естественными процессами в окружающей среде) и техногенные (возникающие вследствие антропогенного воздействия на технические объекты или инфраструктуру) [1].

В условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с обрушением зданий и сооружений, наличие опасных факторов завала, таких как

низкое содержание кислорода, риск вторичных обрушений, воздействие низких или высоких температур, а также психофизиологические нагрузки, представляет непосредственную угрозу жизни и здоровью пострадавших. Это обуславливает необходимость оперативного проведения поисково-спасательных работ, где время играет критически важную роль. Чем быстрее будут обнаружены и извлечены пострадавшие, тем выше вероятность их выживания и тем быстрее будут минимизированы последствия для здоровья. Данные работы осуществляются в соответствии с установленной типовой технологией ведения аварийно-спасательных работ (рис. 1).

Поиск пострадавших представляет собой один из ключевых этапов поисково-

спасательных работ, включающий комплекс мероприятий, направленных на определение местоположения людей и их состояния, организацию связи с ними и принятия решения на оказание требуемой помощи в нужном объеме.

Основные способы поиска пострадавших представлены на рис. 2.

Выбор оптимальных методов поиска определяется совокупностью факторов, включающих доступность материально-тех-

нических и человеческих ресурсов, задействованных в ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, специфику оперативной обстановки в зоне проведения аварийно-спасательных работ, а также характером и масштабом задач, поставленных перед спасательными подразделениями. Данные критерии формируют основу для принятия решений, направленных на обеспечение эффективности и целесообразности применяемых поисковых технологий.

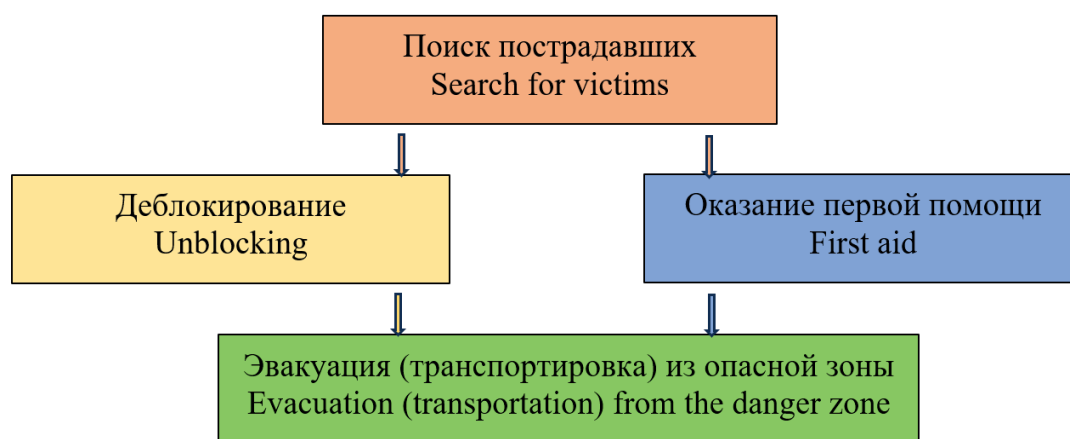


Рис. 1. Типовая технология ведения аварийно-спасательных работ

Fig. 1. Typical technology of emergency rescue operations

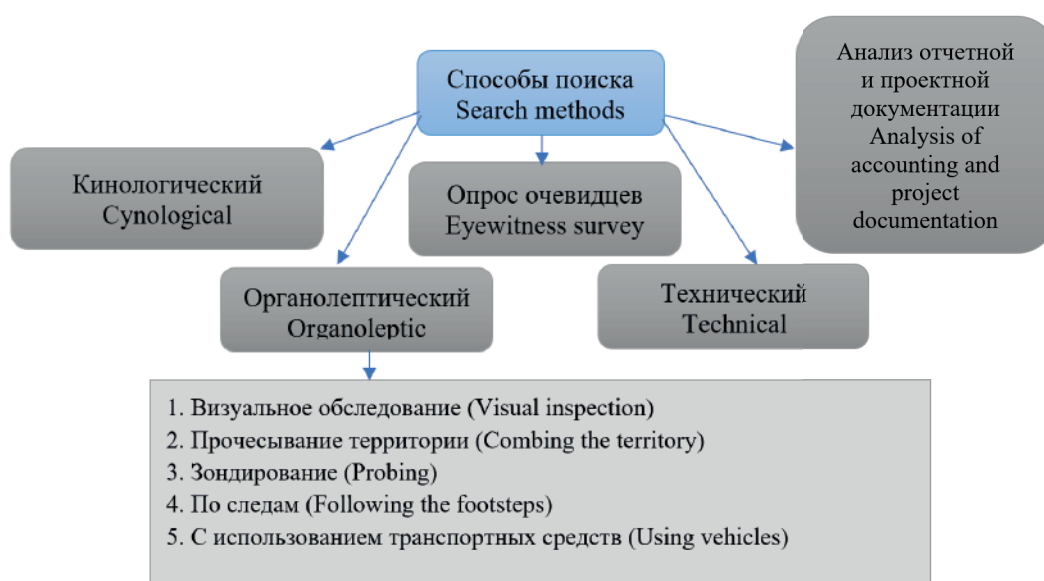


Рис. 2. Способы поиска пострадавших

Fig. 2. Ways to find victims

Основная часть

Одним из наиболее эффективных способов поиска пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, вызванных разрушением зданий и сооружений, является применение технических средств, что позволяет с высокой степенью вероятности идентифицировать местонахождение и состояние пострадавших.

Средства поиска пострадавших в завалах представляют собой специализированные технические устройства, функционально ориентированные на выявление и фиксацию биометрических признаков жизнедеятельности человека, находящегося под слоем разрушенных конструкций. Их функционирование основано на интеграции нескольких физических принципов обнаружения, включая акустический, оптический (телевизионные технологии), радиолокационный (с использованием георадаров и биорадаров), электрографический, тепловой, а также химический методы. Совокупность таких устройств формирует комплексную систему поиска [2, 3].

На основе проведенного краткого анализа технических средств поиска пострадавших (далее — ТСПП) в чрезвычайных ситуациях, связанных с разрушением зданий и сооружений, можно сделать вывод о том, что ключевыми параметрами технических средств поиска пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением зданий и сооружений, являются: дальность обнаружения пострадавших (L), вероятность успешного обнаружения пострадавших (W), надежность работы системы (N_{ϕ}) и длительность работы в каждой точке поиска (t_c) [10].

Совокупность указанных параметров формирует концептуальную основу для оценки эффективности технических средств, при-

меняемых для поиска пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций. Данное понятие раскрывается через оценку операционной производительности технического устройства, которая количественно выражается в доле успешно идентифицированных пострадавших, находящихся под слоем завала, за фиксированный временной интервал, с учетом вероятности возникновения ложноположительных результатов [5, 6].

Таким образом, эффективность средств поиска представляет собой комплексный показатель, отражающий не только скорость и точность обнаружения, но и надежность работы системы в целом в условиях неопределенности данных, характерных для зон бедствия.

С учетом изложенного возникает необходимость использования комплексного показателя P , представляющего собой функцию от множества частных показателей, выявленных в ходе анализа, которые необходимо максимизировать. Этот показатель позволяет комплексно оценить эффективность технического средства с учетом всех значимых параметров.

В формализованном виде задача оценки эффективности технических средств поиска пострадавших по присущим им параметрам выглядит следующим образом [9].

Необходимо определить такой i -й прибор поиска, который обеспечит максимальную эффективность P для заданных:

P_i — эффективность i -го прибора поиска;

L_i — дальность обнаружения пострадавших i -го прибора поиска;

W_i — вероятность успешного обнаружения пострадавших i -го прибора поиска;

$N_{\phi i}$ — надежность работы системы i -го прибора поиска;

t_{ci} — длительность работы в каждой точке поиска i -го прибора поиска.

$$P_i = f(P_i(L_i, W_i, N_{\phi i}, t_{ci}) \Rightarrow \max. \quad (1)$$

Одними из важных показателей являются вероятность успешного обнаружения пострадавших и дальность их обнаружения. Чем выше дальность и вероятность обнаружения пострадавших, тем будет больше значение комплексного показателя P , а следовательно, и эффективность прибора.

Однако в формализованном виде задача оценки эффективности технических средств учитывает только технические характеристики прибора, но не учитывает влияние различных параметров завала (размеры,

состав, плотность) и условия окружающей среды. На основе этого, вместе с введением весовых коэффициентов для технических характеристик прибора, имеется необходимость ввести коэффициенты K_z и K_j , зависящие от условий завала и окружающей среды соответственно, учитывая при этом физический принцип работы прибора.

Для решения задачи на рис. 3 представлена общая схема проведения исследования, которая включает перечисленные ниже этапы [5].

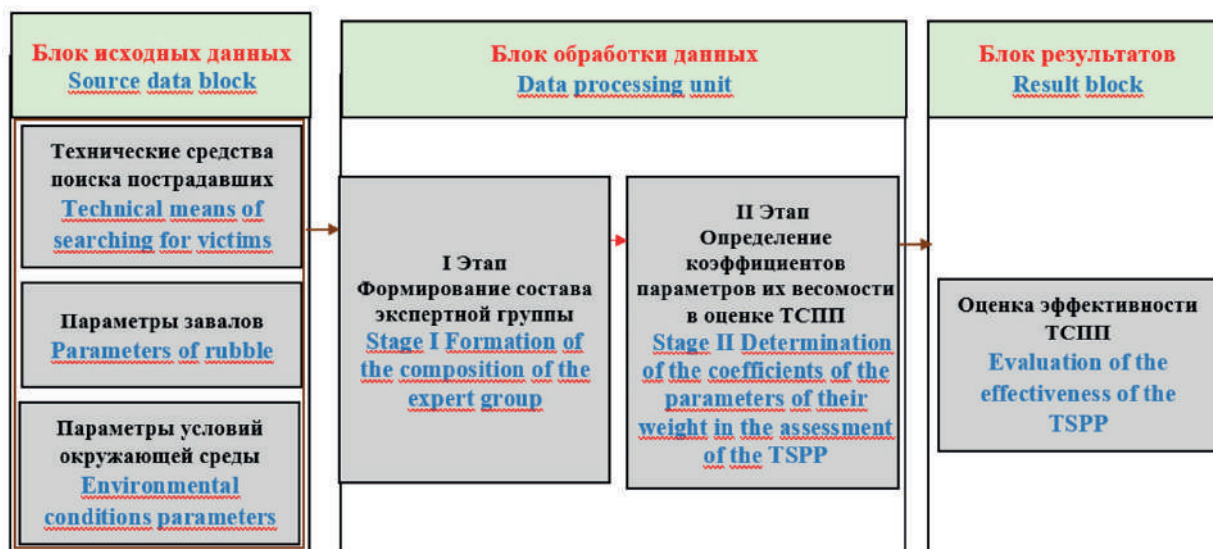


Рис. 3. Общая схема проведения исследования по определению комплексного показателя для оценки технических средств поиска пострадавших

Fig. 3. General scheme of the study to determine a comprehensive indicator for assessing the technical means of searching for victims

И этап. Формирование состава экспертной группы

Поскольку для решения задачи по оценке эффективности технических средств поиска пострадавших в качестве исходных данных используется информация, полученная на основе обработки экспертных мнений, целесообразно выработать общий концептуальный подход к формированию экспертных групп, который будет использоваться

при решении ряда частных задач в ходе проведения исследования.

Анализ проведенных ранее исследований [5–7] показал, что выбор состава экспертной группы представляет собой многоэтапный процесс, состоящий из следующих процедур.

1. Определение предметной области исследования, зависящей от поставленной цели и перечня исходных данных,

необходимых для проведения исследования. В тематике данного исследования очевидно, что областью исследования являются технические приборы поиска и подходы к повышению эффективности их применения. Вследствие этого выбор экспертов для проведения исследования целесообразно осуществлять из числа специалистов, в функциональные обязанности которых входят проектирование и производство технических средств поиска, у которых имеется опыт в проведении поисково-

спасательных работ с приборами поиска, и/или из числа профессорско-преподавательского состава учебных заведений.

2. Формирование списка возможных кандидатов в состав экспертной группы, который может быть составлен с помощью метода снежного кома [8].

3. Оценка уровня компетентности специалистов, включаемых в состав экспертных групп. В ходе анализа работ было выявлено, что для оценки уровня компетентности (F_g) каждого g -го эксперта целесообразно использовать формулу (2).

$$F_g = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 F_{gm} , \quad (2)$$

где:

F_{g1} — коэффициент, отражающий уровень профессиональной подготовки и информированности g -го эксперта;

F_{g2} — коэффициент, отражающий уровень базовой аргументации g -го эксперта при принятии им решения;

F_{g3} — коэффициент, отражающий личные качества g -го эксперта, вычисляемый на основании самооценки;

F_{g4} — коэффициент, отражающий личные качества g -го эксперта, определяемый на основе мнений всех экспертов;

F_{g5} — коэффициент, отражающий уровень согласованности действий g -го эксперта с членами рабочей группы при проведении тестовой оценки уровня важности определенного фактора или варианта при заданном их наборе.

Приведенные коэффициенты могут быть определены в соответствии с методическим подходом к формированию состава экспертной группы, изложенным в статье.

4. Формирование окончательного списка экспертов рабочей группы. Для решения данной задачи всех экспертов.

II этап. Определение коэффициентов параметров и их весомости в оценке технических средств поиска пострадавших

Для количественной оценки эффективности технических средств поиска пострадавших в завалах в данной работе использованы метод экспертных оценок (аналитической иерархии, метод Саати) и статистический анализ данных испытаний [8].

Для составления экспертной оценки была сформирована группа из десяти специалистов, которые имеют опыт работы в зонах разрушений зданий и сооружений: разработчики поискового оборудования, а также преподаватели и авторы публикаций на данную тематику.

Специалистам было предложено сравнить четыре параметра попарно по 9-бальной шкале, где:

1 — равная важность параметров;

2 — умеренное превосходство одного над другим;

- 5 — сильное превосходство;
 7 — очень сильное превосходство;
 9 — абсолютное превосходство.

В результате получилась итоговая матрица парных сравнений параметров (табл. 1).

Для нормализации матрицы для каждого столбца вычисляется сумма, затем каждый элемент делится на сумму своего столбца. Нормализованная матрица представлена в табл. 2.

Таблица 1
Итоговая матрица попарных сравнений
 Table 1
 The final matrix of pairwise comparisons

Параметр Parameter	L	W	N_{Φ}	t_c
L	1	2	4	6
W	1/2	1	3	5
N_{Φ}	1/4	1/3	1	3
t_c	1/6	1/5	1/3	1

Таблица 2
Нормализованная матрица попарных сравнений
 Table 2
 Normalized matrix of pairwise comparisons

Параметр Parameter	L	W	N_{Φ}	t_c
L	0,522	0,566	0,480	0,400
W	0,261	0,283	0,360	0,333
N_{Φ}	0,130	0,094	0,120	0,200
t_c	0,087	0,057	0,040	0,067

Определение весомости коэффициентов:

$$K_L = \frac{0,522 + 0,566 + 0,480 + 0,400}{4} = 0,492.$$

$$K_W = \frac{0,261 + 0,283 + 0,360 + 0,333}{4} = 0,309.$$

$$K_{N_{\Phi}} = \frac{0,130 + 0,094 + 0,120 + 0,200}{4} = 0,136.$$

$$K_{t_c} = \frac{0,087 + 0,057 + 0,040 + 0,067}{4} = 0,063.$$

Чтобы избежать влияния разных единиц измерения, все параметры приводятся к безразмерному виду (например, по шкале 0–1):

$$L_{\text{норм}} = \frac{L}{L_{\text{max}}}, W_{\text{норм}} = \frac{W}{100}, N_{\text{норм}} = \frac{N_{\phi}}{100}, t_{\text{норм}} = 1 - \frac{t_c}{t_{\text{max}}}. \quad (3)$$

Время t_c инвертируется, т. к. меньшее время в данном случае лучше.

Комплексный показатель P вычисляется как линейная комбинация параметров с их весами:

$$P = k_L \cdot L_{\text{норм}} + k_W \cdot W_{\text{норм}} + k_{N_{\phi}} \cdot N_{\text{норм}} + k_{t_c} \cdot t_{\text{норм}}. \quad (4)$$

Подставляя значение весовых коэффициентов:

$$P = 0,49 \cdot L_{\text{норм}} + 0,31 \cdot W_{\text{норм}} + 0,14 \cdot N_{\text{норм}} + 0,06 \cdot t_{\text{норм}}.$$

Если же нормировка не применяется, формула может быть записана в исходных единицах, но с коэффициентами масштабирования:

$$P = 0,49 \cdot \frac{L}{30} + 0,31 \cdot \frac{W}{100} + 0,14 \cdot \frac{N_{\phi}}{100} + 0,06 \cdot \left(1 - \frac{t_c}{15}\right).$$

Для примера возьмем прибор с $L = 25$ м, $W = 80$ %, $N_{\phi} = 90$ %, $t_c = 5$ мин:

$$P = 0,49 \cdot \frac{25}{30} + 0,31 \cdot 0,8 + 0,14 \cdot 0,9 + 0,06 \cdot \left(1 - \frac{5}{15}\right) = 0,41 + 0,25 + 0,13 + 0,04 = 0,83.$$

Тогда итоговая формула имеет вид:

$$P = 0,49 \cdot L_{\text{норм}} + 0,31 \cdot W_{\text{норм}} + 0,14 \cdot N_{\text{норм}} + 0,06 \cdot t_{\text{норм}}. \quad (5)$$

Определение коэффициента K_z . Для расчета и анализа возьмем следующие варианты условий завала.

1-й вариант: кирпичные здания и сооружения ($z = 1$). В данном случае завал имеет следующую структуру:

- обломки железобетонных и бетонных конструкций (до $0,8 \text{ м}^3$) — 60 %;
- кирпичные обломки (до 1 м^3) — 20 %;
- металлические конструкции — 10 %;
- строительный мусор — 7 %;
- деревянные конструкции — 3 %.

2-й вариант: панельные здания и сооружения ($z = 2$). В данном случае завал имеет следующую структуру:

- обломки железобетонных и бетонных конструкций (до $0,8 \text{ м}^3$) — 75 %;
- деревянные конструкции — 18 %;
- строительный мусор — 5 %;

- металлические конструкции — 2 %.

3-й вариант: кирпичные промышленные здания и сооружения ($z = 3$). В данном случае завал имеет следующую структуру:

- крупногабаритные обломки (более 5 т) — 60 %;
- мелкие обломки и строительный мусор — 15 %;
- средние обломки (0,2–2 т) — 15 %;
- крупные обломки (2–5 т) — 10 %.

4-й вариант: панельные промышленные здания и сооружения ($z = 4$). В данном случае завал имеет следующую структуру:

- крупногабаритные обломки (более 5 т) — 60 %;
- средние обломки (0,2–2 т) — 20 %;
- крупные обломки (2–5 т) — 10 %;
- мелкие обломки и строительный мусор — 10 %.

Для анализа за стандартную площадь завала, при разрушении зданий и сооружений, принята площадь в 1 000 м².

Размеры зоны завала:

1-й вариант ($u = 1$): длина $a = 100$ м, ширина $b = 100$ м, высота $h = 5$ м.

2-й вариант ($u = 2$): длина $a = 50$ м, ширина $b = 20$ м, высота $h = 3$ м (разрушение стандартного панельного дома).

Рассчитаем коэффициент K_z для акустических ТСПП. Для каждого типа завала коэффициент вычисляется по формуле:

$$K_z = 1 + \left(\sum_{i=1}^3 w_i \cdot x_i \right) - C, \quad (6)$$

где:

w_i — весовые коэффициенты параметров;

x_i — нормированные значения параметров (0–1);

$C = 0,5$ — эмпирическая константа коррекции.

Методом экспертных оценок были определены весовые коэффициенты:

$$W_{\text{пустоты}} = 0,4.$$

$$W_{\text{шумы}} = 0,26.$$

$$W_{\text{глубина}} = 0,34.$$

Введем эталонные значения для нормировки:

$$\text{Пустоты}_{\max} = 50 \%, \text{ Шумы}_{\max} = 100 \text{ дБ}, \text{ Глубина}_{\max} = 10 \text{ м}.$$

Произведем расчет для каждого сценария:

$z = 1$ (кирпичные здания):

$$\text{пустоты} — 35 \% \rightarrow x_1 = \frac{35}{50} = 0,7,$$

$$\text{шумы} — 65 \text{ дБ} \rightarrow x_2 = 1 - \frac{65}{100} = 0,35,$$

$$\text{глубина} — 2,1 \text{ м} \rightarrow x_3 = 1 - \frac{2,1}{10} = 0,79,$$

$$K_{z=1} = 1 + (0,40 \cdot 0,70 + 0,26 \cdot 0,35 + 0,34 \cdot 0,79) - 0,5 = 1 + (0,280 + 0,091 + 0,2686) - 0,5 = 1,14.$$

$z = 2$ (панельные здания):

$$\text{пустоты} — 15 \% \rightarrow x_1 = \frac{15}{50} = 0,3,$$

$$\text{шумы} — 75 \text{ дБ} \rightarrow x_2 = 1 - \frac{75}{100} = 0,25,$$

$$\text{глубина} — 3,4 \text{ м} \rightarrow x_3 = 1 - \frac{3,4}{10} = 0,66,$$

$$K_{z=2} = 1 + (0,40 \cdot 0,30 + 0,26 \cdot 0,25 + 0,34 \cdot 0,66) - 0,5 = 1 + (0,12 + 0,065 + 0,2244) - 0,5 = 0,91.$$

$z = 3$ (промышленные здания кирпичные):

$$\begin{aligned} \text{пустоты} &— 12 \% \rightarrow x_1 = \frac{12}{50} = 0,24, \\ \text{шумы} &— 80 \text{ дБ} \rightarrow x_2 = 1 - \frac{80}{100} = 0,20, \\ \text{глубина} &— 4,2 \text{ м} \rightarrow x_3 = 1 - \frac{4,2}{10} = 0,58, \\ K_{z=3} &= 1 + (0,40 \cdot 0,24 + 0,26 \cdot 0,20 + 0,34 \cdot 0,58) - 0,5 = 1 + (0,096 + 0,052 + 0,1972) - \\ &\quad - 0,5 = 0,85. \end{aligned}$$

$z = 4$ (промышленные здания панельные):

$$\begin{aligned} \text{пустоты} &— 8 \% \rightarrow x_1 = \frac{8}{50} = 0,16, \\ \text{шумы} &— 85 \text{ дБ} \rightarrow x_2 = 1 - \frac{85}{100} = 0,15, \\ \text{глубина} &— 5 \text{ м} \rightarrow x_3 = 1 - \frac{5}{10} = 0,5, \\ K_{z=4} &= 1 + (0,40 \cdot 0,16 + 0,26 \cdot 0,15 + 0,34 \cdot 0,50) - 0,5 = 1 + (0,064 + 0,039 + \\ &\quad + 0,170) - 0,5 = 0,77. \end{aligned}$$

Рассчитаем коэффициент K_z для оптических ТСПП. Для каждого типа завала коэффициент вычисляется по формуле:

$$K_z = 1 + \left(\sum_{i=1}^3 w_i \cdot x_i \right) - C + \Delta_{\text{метал}}, \quad (8)$$

где:

w_i — весовые коэффициенты параметров;

x_i — нормированные значения параметров (0–1);

$C = 0,5$ — эмпирическая константа коррекции;

$\Delta_{\text{метал}}$ — поправка на металлические включения.

Методом экспертных оценок по шкале Саати были определены весовые коэффициенты:

$$\begin{aligned} \text{металлические включения} &— W_1 = 0,45, \\ \text{влажность среды} &— W_2 = 0,30, \\ \text{плотность завала} &— W_3 = 0,25. \end{aligned}$$

Введем эталонные значения для нормировки:

$$x_1 = \frac{W_{11}}{30 \%}, \quad x_2 = 1 - \frac{W_{22}}{100 \%}, \quad x_3 = 1 - \frac{W_{33}}{2500}, \quad \Delta_{\text{метал}} = 0,1 \left(1 - \frac{W_{11}}{50 \%} \right).$$

Произведем расчет для каждого сценария:

$z = 1$ (кирпичные здания):

$$\begin{aligned} W_{11} &= 35 \% \rightarrow x_1 = 0,33, \\ W_{22} &= 60 \% \rightarrow x_2 = 0,4, \\ W_{33} &= 1800 \rightarrow x_3 = 0,28, \\ \Delta_{\text{метал}} &= 0,08, \\ K_{z=1} &= 1 + (0,45 \cdot 0,33 + 0,30 \cdot 0,40 + 0,25 \cdot 0,28) - 0,5 + 0,08 = 1,05. \end{aligned}$$

$z = 2$ (панельные здания):

$$\begin{aligned} W_{11} &= 18 \% \rightarrow x_1 = 0,33, \\ W_{22} &= 70 \% \rightarrow x_2 = 0,3, \\ W_{33} &= 2100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \rightarrow x_3 = 0,16, \\ \Delta_{\text{метал}} &= 0,06, \\ K_{z=2} &= 1 + (0,45 \cdot 0,60 + 0,30 \cdot 0,30 + 0,25 \cdot 0,16) - 0,5 + 0,06 = 0,85. \end{aligned}$$

$z = 3$ (промышленные кирпичные здания):

$$\begin{aligned} W_{11} &= 25 \% \rightarrow x_1 = 0,83, \\ W_{22} &= 75 \% \rightarrow x_2 = 0,25, \\ W_{33} &= 2300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \rightarrow x_3 = 0,08, \\ \Delta_{\text{метал}} &= 0,05, \\ K_{z=3} &= 1 + (0,45 \cdot 0,83 + 0,30 \cdot 0,25 + 0,25 \cdot 0,08) - 0,5 + 0,05 = 0,73. \end{aligned}$$

$z = 4$ (промышленные панельные здания):

$$\begin{aligned} W_{11} &= 32 \% \rightarrow x_1 = 1, \\ W_{22} &= 80 \% \rightarrow x_2 = 0,20, \\ W_{33} &= 2400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \rightarrow x_3 = 0,04, \\ \Delta_{\text{метал}} &= 0,04. \\ K_{z=4} &= 1 + (0,45 \cdot 1 + 0,30 \cdot 0,20 + 0,25 \cdot 0,04) - 0,5 + 0,04 = 0,65. \end{aligned}$$

Результаты вычислений коэффициента K_z для различных типов технических средств поиска представлены в табл. 3.

Таблица 3
Значение коэффициента K_z
Table 3
The value of the K_z coefficient

	Акустические ТСПП Acoustic TSPP	Оптические ТСПП Optical TSPP	Радиолокационные ТСПП Radar TSPP
Кирпичные здания Brick buildings	1,14	0,85	1,05
Панельные здания Panel buildings	0,91	0,72	0,85
Промышленные кирпичные здания Industrial brick buildings	0,85	0,58	0,73
Промышленные панельные здания Industrial panel buildings	0,77	0,53	0,65

Определение коэффициента K_j . С помощью анализа иерархий методом экспертных оценок по методологии Саати получили

следующие значения коэффициентов, представленные в табл. 4, для акустических, радиолокационных и оптических ТСПП.

Таблица 4
Значение коэффициента K_j
Table 4
The value of the K_j coefficient

	Ясно Clear	Дождь Rain	Туман Fog	Снегопад Snowfall
Акустические ТСПП Acoustic TSPP	0,95	0,49	0,65	0,38
Оптические ТСПП Optical TSPP	0,98	0,60	0,45	0,25
Радиолокационные ТСПП Radar TSPP	0,92	0,62	0,78	0,55

Результаты вычислений. Вычислив коэффициенты, учитывающие особенности завалов и влияние погодных условий окружающей среды, получаем следующую формулу:

$$P = (0,49 \cdot \frac{L}{30} + 0,31 \cdot \frac{W}{100} + 0,14 \cdot \frac{N_{\Phi}}{100} + 0,06 \cdot (1 - \frac{t_c}{15})) \cdot K_z \cdot K_j. \quad (9)$$

Для наглядной демонстрации комплексного показателя рассчитаем P для следующих приборов: «АПП-1»; «Система-1К», «Радар-01». Для расчетов возьмем кирпичное здание и погодные условия окружающей среды — ясно.

Как видно из расчетов, наибольшую эффективность ($P = 0,79$) среди сравниваемых приборов демонстрирует «Радар-01», что

подтверждает его преимущество в условиях разрушений зданий и сооружений для анализируемого сценария ЧС.

Предложенная комплексная модель по оценке эффективности ТСПП, по сравнению с другими моделями, учитывает не только тактико-технические характеристики ТСПП, но и влияние характеристик завала и погодных условий окружающей среды.

«АПП-1»:

$$P = (0,49 \cdot 0,67 + 0,31 \cdot 0,85 + 0,14 \cdot 0,88 + 0,06 \cdot 0,60) \cdot 1,10 \cdot 0,95 = 0,78.$$

«Система-1К»:

$$P = (0,49 \cdot 0,5 + 0,31 \cdot 0,9 + 0,14 \cdot 0,92 + 0,06 \cdot 0,47) \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,57.$$

«Радар-01»:

$$P = (0,49 \cdot 0,83 + 0,31 \cdot 0,8 + 0,14 \cdot 0,85 + 0,06 \cdot 0,67) \cdot 1,05 \cdot 0,92 = 0,79.$$

Заключение

Применение предложенной модели, базирующейся на использовании комплексного показателя (P), открывает новые перспективы для проведения многокритериального и системного анализа эффективности технических средств, используемых для поиска и обнаружения пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с масштабными разрушениями зданий и сооружений. Данная методология позволяет не только выявить и систематизировать ключевые аспекты, требующие оптимизации в конструкции и функциональных характеристиках поискового оборудования, но и провести их всестороннюю практическую апробацию с учетом практического опыта применения технических средств поиска пострадавших.

Такой подход обеспечивает научно обоснованный выбор наиболее важных признаков, обеспечивающих эффективное применение приборов поиска, адаптированных под специфику различных сценариев катастроф, включая особенности разрушен-

ных конструкций, степень завалов, наличие опасных факторов и другие параметры. Внедрение данной модели способствует значительному повышению оперативности и точности поисково-спасательных операций, что напрямую влияет на сокращение временных интервалов, необходимых для обнаружения пострадавших и минимизацию рисков, связанных с их жизнью и здоровьем. Ведь чем эффективнее выбранный или спроектированный прибор, тем при его использовании будет быстрее найден пострадавший, тем самым вероятность сохранения жизни и здоровья будет выше.

Кроме того, применение комплексного показателя (P) дает возможность систематизировать оценку эффективности технических средств, что упрощает разработку универсальных критериев для их сравнения и выбора. Это формирует основу для совершенствования нормативной базы, регулирующей использование поискового оборудования, а также для создания инновационных технологий, повышающих устойчивость и надежность техники в чрезвычайных условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Федер. закон № 68-ФЗ от 21.12.1994 : принят Государственной Думой 11.11.1994 // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (дата обращения: 24.01.2025).
2. ГОСТ 22.9.22–2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства аварийно-спасательные. Классификация : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07.12.2023 № 1535-ст : введен впервые // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/408378205/> (дата обращения: 24.01.2025).
3. ГОСТ 22.9.04–2022. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства поиска людей в завалах. Общие технические требования : введен в действие Приказом Федерального агентства

по техническому регулированию и метрологии от 31.08.2022 № 852-ст : взамен ГОСТ 22.9.04–97 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192954> (дата обращения: 24.02.2025).

4. Комплексная методика обоснования рациональных параметров программы боевого слаживания специальных формирований гражданской обороны / Е. Б. Кондратьев [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2021. № 4 (51). С. 33–42. URL: <https://clck.ru/3NxLV7> (дата обращения: 10.02.2025).

5. Методы экспертных оценок / В. Е. Горелов [и др.]. М., 1997. 165 с.

6. Получение и анализ экспертной информации / В. Н. Бурнов [и др.]. М., 1991. 273 с.

7. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М., 1993. 198 с.

8. Запорожец А. И., Коробков С. Н., Тодосейчук С. П. О методологическом подходе к оценке эффективности технических средств поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях // Технологии гражданской безопасности. С. 94–99. URL: <https://clck.ru/3NxLpy> (дата обращения: 24.01.2025).

9. Аксенов М. Б., Переяслов А. Н. Основные тенденции развития приборов поиска пострадавших // Технологии гражданской безопасности. С. 100–109. URL: <https://clck.ru/3NxMJr> (дата обращения 24.02.2025).

REFERENCES

1. On the Protection of the Population and Territories from Natural and Man-made Emergencies : Federal Law № 68-FZ dated 21.12.1994 : adopted by the State Duma on 11.11.1994 // ConsultantPlus. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (date of application: 24.01.2025).

2. GOST 22.9.22–2023. Safety in emergency situations. Emergency rescue equipment. Classification : approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 07.12.2023 No. 1535-st: introduced for the first time // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/408378205/> (date of application: 24.01.2025).

3. GOST 22.9.04–2022. Safety in emergency situations. Means of searching for people in the rubble. General technical requirements : Enacted by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 31.08.2022 № 852-st : in place of GOST 22.9.04–974 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192954> (date of application: 24.02.2025).

4. A comprehensive methodology for substantiating the rational parameters of the combat coordination program for special civil defense formations // E. B. Kondratiev et al. URL: <https://clck.ru/3NxLV7> (date of application: 10.02.2025).

5. Methods of expert assessments / V. E. Gorelov et al. M., 1997. 165 p.

6. Obtaining and analyzing expert information / V. N. Burnov et al. M., 1991. 273 p.

7. Saati T. L. Decision-making. Hierarchy analysis method. Trans. M., 1993. 198 p.

8. Zaporozhets A. I., Korobkov S. N., Todoseychuk S. P. On a methodological approach to assessing the effectiveness of technical means of searching for victims in emergency situations // Civil Security Technology. pp. 94–99. URL: <https://clck.ru/3NxLpy> (date of application: 24.01.2025).

9. Aksenov M. B., Pereyaslov A. N. The main trends in the development of victim search devices // Civil Security Technology. pp. 100–109. URL: <https://clck.ru/3NxMJr> (date of application: 24.02.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселов Алексей Вячеславович, старший преподаватель кафедры аварийно-спасательных работ Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); РИНЦ ID: 1111605; e-mail: Alexey-19_87@mail.ru

Давыдов Роман Михайлович, курсант командно-инженерного факультета Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); e-mail: roma2003101@yandex.ru

Кузьмин Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной и экологической безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10); SPIN-код: 5231-2804; e-mail: avkuzmin16@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Veselov, Senior Lecturer at the Department of Emergency Rescue Operations of the Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str. Moscow region, Khimki, md. Novogorsk 141435, Russian Federation); RSCI ID: 1111605; e-mail: Alexey-19_87@mail.ru

Roman M. Davydov, cadet of the command and engineering faculty of the Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya str. Moscow region, Khimki, md. Novogorsk 141435, Russian Federation); e-mail: roma2003101@yandex.ru

Alexander V. Kuzmin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Environmental Safety, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (10 Karla Marksa str., Kazan, 420111, Russian Federation); SPIN-код: 5231-2804; E-mail: avkuzmin16@gmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2025
Одобрена после рецензирования 07.05.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.8+364.07

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВОЛОНТЕРСКОГО И ДОБРОВОЛЬЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Полторанов Денис Владимирович¹, Арефьева Елена Валентиновна², Кузнецова Таисия Дмитриевна¹

¹ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. Москва, Российская Федерация

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье выполнен анализ статистических данных волонтерских организаций, привлекаемых волонтеров по федеральным округам Российской Федерации, рассматривается потенциал и роль волонтерского движения при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Анализируются качественные и количественные характеристики волонтеров и добровольцев, формы участия добровольцев, их взаимодействие с государственными структурами, а также проблемы и перспективы развития волонтерской активности в данной сфере.

Ключевые слова: волонтерство, чрезвычайная ситуация, ликвидация последствий, гуманитарная помощь, гражданское участие, добровольчество

Для цитирования: Полторанов Д. В., Арефьева Е. В., Кузнецова Т. Д. Анализ потенциала волонтерского и добровольческого движения в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 114–134.

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF VOLUNTEER MOVEMENT IN THE FIELD OF PREVENTION AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF EMERGENCY SITUATIONS

Denis V. Poltoranov¹, Elena V. Arefieva², Taisiya D. Kuznetsova¹

¹ VNII GOChS (FC), Moscow, Russian Federation

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russian Federation

Abstract. The article analyzes statistical data of volunteer organizations, volunteers involved in federal districts of the Russian Federation. It also considers the potential and role of the volunteer movement in the liquidation of emergency situations (ES). The qualitative and quantitative characteristics of volunteers, forms of participation of volunteers, their interaction with government agencies, as well as problems and prospects for the development of volunteer activity in this area are analyzed.

Keywords: volunteering, emergency, disaster relief, humanitarian aid, civic participation, volunteering

For Citation: Poltoranov D. V., Arefieva E. V., Kuznetsova T. D. Analysis of the potential of volunteer movement in the field of prevention and elimination of consequences of emergency situations // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 114–134.

Введение

Чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера представляют собой серьезную угрозу для жизни и здоровья населения, а также для устойчивого функционирования социальной и экономической инфраструктуры. В условиях повышенной загруженности государственных служб при ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций особую роль приобретает волонтерское движение — стихийная или организованная помощь граждан, направленная на минимизацию последствий

ЧС. Современная практика показывает, что волонтеры способны эффективно дополнять профессиональные привлекаемые силы, особенно в фазах экстренного реагирования и восстановления [1].

Волонтерская деятельность в контексте ЧС — это добровольное, безвозмездное участие граждан в мероприятиях по предупреждению, реагированию и ликвидации последствий катастроф. Формы участия волонтеров и добровольцев в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций представлены в табл. 1.

Таблица 1
Формы участия волонтеров и добровольцев в области предупреждения и ликвидации последствий ЧС (получено авторами)

Table 1

Forms of participation of volunteers in the field of prevention and elimination of consequences of emergencies (data obtained by the authors)

№ п/п	Форма участия Form of participation	Описание деятельности Activity description
1	Оперативная помощь Prompt assistance	Прямое участие на месте ЧС, помощь пострадавшим, раздача предметов первой необходимости Direct participation at the emergency site, assistance to victims, distribution of relief items
2	Тыловая поддержка Logistic support	Работа на складах, сортировка и упаковка гуманитарной помощи Warehouse work, sorting and packing of humanitarian aid
3	Специализированная помощь Specialty care	Первая медицинская, психологическая помощь, спасательные работы при наличии подготовки First aid, psychological aid, rescue works if qualified
4	Медиа-волонтерство Media volunteerism	Сбор и распространение информации, координация через цифровые платформы Acquisition and dissemination of information
5	Восстановительные работы Recovery efforts	Участие в расчистке территорий, ремонте инфраструктуры Cleanup after disaster and infrastructure repairs

Целью статьи является анализ статистических данных по имеющемуся в стране потенциалу волонтерских организаций, по количеству и качеству волонтеров, привлекаемых к ликвидации ЧС.

Результаты и их обсуждение

Развитие волонтерского движения в рамках социально значимых мероприятий способствует большему вовлечению населения и повышению уровня поддержки со стороны общества. Это также создает возможности для обучения и обмена опытом между волонтерами и профессиональными службами, что повышает общую эффективность работы добровольческих организаций.

Отметим основные тенденции, которые способствуют привлечению волонтеров на современном этапе [2, 3].

1. В целом наблюдается переход от стихийности к системности в организации волонтерской деятельности.

Сегодня прослеживается тенденция на упорядочение и организацию волонтерского движения, заключающаяся в:

- создании официальных реестров добровольцев;
 - проведении сертификации и обучения;
 - включении волонтеров и добровольцев в планы реагирования на региональном и муниципальном уровне.
2. Отмечен рост роли цифровых технологий, что позволяет оперативно привлекать, координировать и обучать волонтеров, а также:
 - разработаны платформы для быстрого оповещения, сбора и управления волонтерами и добровольцами

(например, «Добро.РФ», «ЛизаАлерт» и др.);

- внедрены мобильные приложения с картами и возможностью поставить задачи группе или отдельному волонтеру;
- осуществляется онлайн-обучение (в т. ч. с применением технологий VR/AR-симуляции);
- используются дроны и искусственный интеллект (ИИ), управляемые волонтерами (например, для поиска людей или оценки ущерба).

3. Имеется тенденция формирования постоянной устойчивой системы волонтерского движения. Появляется все больше специализированных волонтерских команд (поисково-спасательные, медицинские, зоозащитные), которые регулярно тренируются и готовы к быстрому разворачиванию.

4. Осуществляются гибридные формы участия волонтеров для выполнения отдельных видов работ, таких как:

- модерация текущей информации;
- обработка спутниковых и аэрофотоснимков для оценки масштабов бедствия;
- онлайн-поддержка пострадавших, что особенно актуально в труднодоступных и арктических регионах.

5. Намечается реализация межведомственного партнерства, т. е. государство, общество, некоммерческие организации, бизнес объединяются для подготовки и поддержки волонтерского движения, что обеспечивает доступ к ресурсам, логистике и массовому привлечению людей.

6. В волонтерской деятельности важным аспектом является психосоциальная поддержка волонтеров, особенно после уча-

ствия их в мероприятиях по ликвидации ЧС и помощи пострадавшему населению:

- вводятся программы психологической и физической разгрузки;
- учитываются вопросы эмоционального выгорания;
- развивается культура заботы и взаимопомощи внутри волонтерских команд.

7. Усиливается международная кооперация в добровольческой помощи.

Крупные бедствия (землетрясения, военные конфликты, техногенные катастрофы) активизируют международные волонтерские сети (например, Red Cross, Team Rubicon, White Helmets), и границы участия стираются [4–6].

Наряду с обозначенными тенденциями современного волонтерского движения необходимо проанализировать и количественные оценки волонтерской деятельности, а также выявить определенную динамику в количественных показателях. Анализ деятельности некоммерческих организаций, имеющих уставные задачи в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, за 2019–2024 гг. в Российской Федерации представлен в табл. 2, сформированной на основе данных аналитических отчетов МЧС России и других государственных служб о развитии добровольческой деятельности в сфере защиты населения и территорий от ЧС [7–9].

Таблица 2

Количественные характеристики некоммерческих организаций, имеющих уставные задачи в области защиты населения и территорий от ЧС (получено авторами)

Table 2

Quantitative characteristics of non-profit organizations with statutory tasks in the field of protecting the population and territories from emergencies (data obtained by the authors)

Анализируемый период Period under analysis	Некоммерческие организации, имеющие уставные задачи в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций Non-profit organizations with statutory objectives in the field of prevention and elimination of consequences of emergency situations				
2019 г. Year 2019	Всего Total	Более 35 тыс. организаций Over 35,000 organizations	В том числе Including		
			в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	в области обеспечения пожарной безопасности in the field of fire safety
			236 объединений associations	45 организаций organizations	34 856 организаций organizations

Продолжение таблицы 2

Анализируемый период Period under analysis	Некоммерческие организации, имеющие уставные задачи в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций Non-profit organizations with statutory objectives in the field of prevention and elimination of consequences of emergency situations				
			в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	Всего Total
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 528 тыс. Over 528,000	Более 20 тыс. Over 20,000	Более 8 тыс. Over 8,000	Более 500 тыс. Over 500,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 11 тыс. Over 11,000	Более 6 тыс. Over 6,000	Более 7 тыс. Over 7,000	Более 5 тыс. Over 5,000
2020 г. Year 2020	Всего Total	Более 600 тыс. организаций Over 600,000 organizations	В том числе Including		
			в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	в области обеспечения пожарной безопасности in the field of fire safety
			403 организаций organizations	94 организаций organizations	34 554 организаций organizations
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 528 тыс. Over 528,000	Более 117 тыс. Over 117,000	Более 7 тыс. Over 7,000	Более 460 тыс. Over 460,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 17 тыс. Over 17,000	Более 7 тыс. Over 7,000	Более 1 тыс. Over 1,000	Более 8 тыс. Over 8,000

Продолжение таблицы 2

Анализируемый период Period under analysis	Некоммерческие организации, имеющие уставные задачи в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций Non-profit organizations with statutory objectives in the field of prevention and elimination of consequences of emergency situations				
2021 г. Year 2021	Всего Total	Более 30,3 тыс. организаций Over 30,300 organizations	в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	Всего Total
			401 организаций organizations	45 организаций organizations	29 854 организаций organizations
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 578 тыс. Over 578,000	Более 120 тыс. Over 120,000	Более 8 тыс. Over 8,000	Более 450 тыс. Over 450,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 19 тыс. Over 19,000	Более 5 тыс. Over 5,000	Более 1 тыс. Over 1,000	Более 12 тыс. Over 12,000
2022 г. Year 2022	Всего Total	Более 22 тыс. организаций Over 22,000 organizations	В том числе Including		
			в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	в области обеспечения пожарной безопасности in the field of fire safety
			418 организаций organizations	74 организаций organizations	21 611 организаций organizations
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 493 тыс. Over 493,000	Более 130 тыс. Over 130,000	Более 8 тыс. Over 8,000	Более 350 тыс. Over 350,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 13 тыс. Over 13,000	Более 5 тыс. Over 5,000	Более 2 тыс. Over 2,000	Более 7 тыс. Over 7,000

Окончание таблицы 2

Анализируемый период Period under analysis	Некоммерческие организации, имеющие уставные задачи в области предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций Non-profit organizations with statutory objectives in the field of prevention and elimination of consequences of emergency situations				
2023 г. Year 2021	Всего Total	Более 21 тыс. организаций Over 21,000 organizations	в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	Всего Total
			436 организаций organizations	74 организаций organizations	20 834 организаций organizations
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 400 тыс. Over 578,000	Более 139 тыс. Over 139,000	Более 8 тыс. Over 8,000	Более 324 тыс. Over 324,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 13 тыс. Over 13,000	Более 5 тыс. Over 5,000	Более 1,5 тыс. Over 1,500	Более 6,8 тыс. Over 6,800
2024 г. Year 2022	Всего Total	Более 21 тыс. организаций Over 21,000 organizations	В том числе Including		
			в области защиты населения и территорий от ЧС in the field of protection of population and territories from emergencies	в области безопасности людей на водных объектах in the field of human safety on water bodies	в области обеспечения пожарной безопасности in the field of fire safety
			514 организаций organizations	—	20 543 организаций organizations
	Личный состав организаций, чел. Personnel of organizations, people	Более 448 тыс. Over 448,000	Более 147 тыс. Over 147,000	—	Более 300 тыс. Over 300,000
	Аттестованы на право ведения аварийно-спасательных работ, чел. Certified to conduct emergency rescue operations, people	Более 7,7 тыс. Over 7,700	Более 6 тыс. Over 6,000	Более 2 тыс. Over 2,000	Более 1,5 тыс. Over 1,500

При этом количество добровольцев, аттестованных на право ведения аварийно-спасательных работ, имеет тенденцию к уменьшению (рис. 1). Количество общественных объединений, занятых в волонтерском движении, также сократилось

за последние 5 лет с 35 тыс. организаций до 19 тыс. организаций. Тем не менее активность добровольцев продолжает оставаться серьезным потенциалом для помощи официальным структурам, оказывающим помощь населению в условиях ЧС.

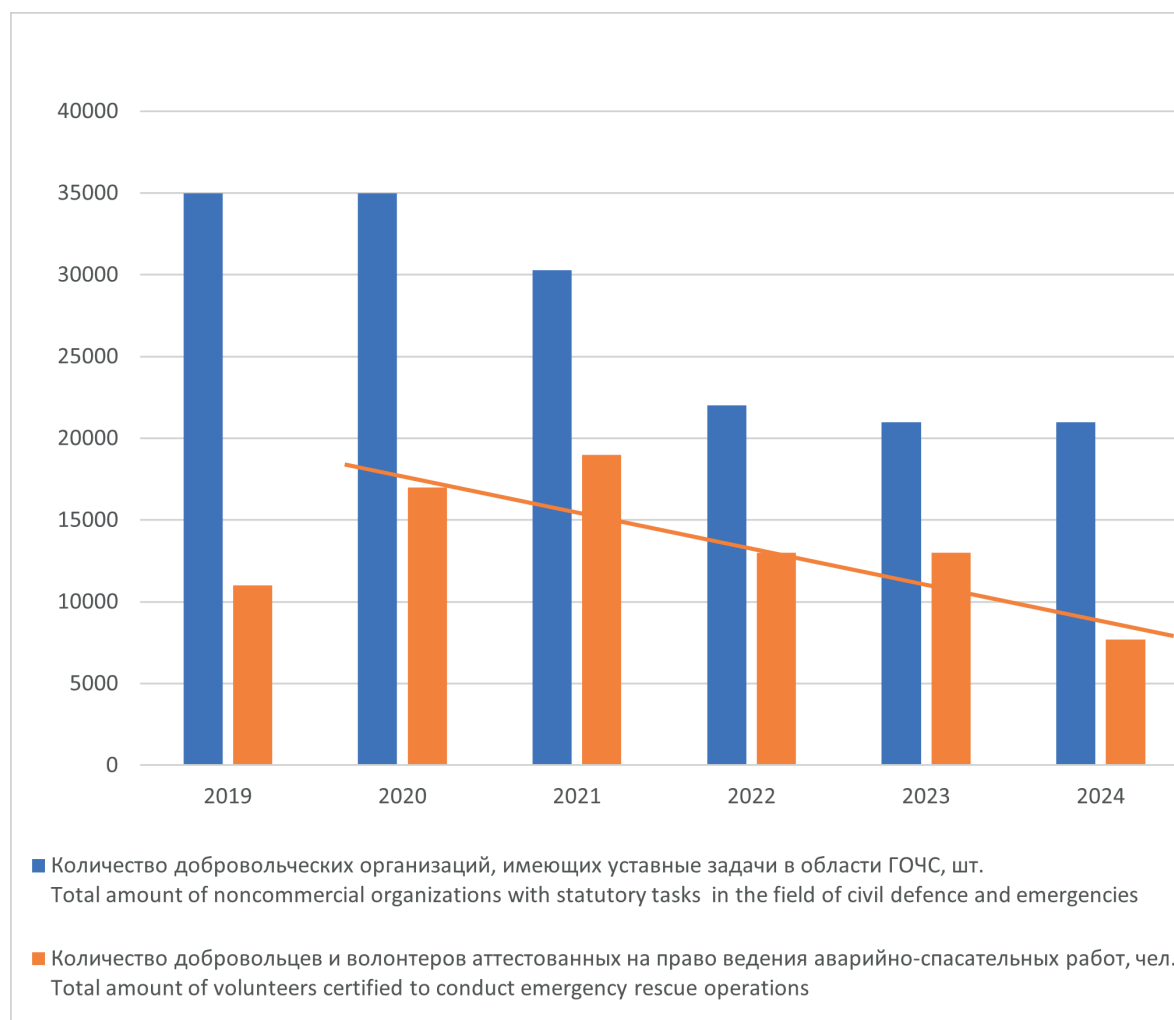


Рис. 1. Количественные характеристики добровольческих и волонтерских организаций в области защиты населения и территорий от ЧС

Fig. 1. Quantitative characteristics of volunteer and volunteer organizations in the field of protecting the population and territories from emergencies

За анализируемый период времени некоммерческие организации, имеющие уставные задачи в области защиты населения и территорий от ЧС, участвовали

во множестве мероприятий по ликвидации ЧС. Количественные характеристики проведенных мероприятий представлены в табл. 3.

Таблица 3

Количественные характеристики некоммерческих организаций, имеющих уставные задачи в области защиты населения и территорий от ЧС, принимавших участие в мероприятиях по ликвидации ЧС, [1] (получено авторами)

Table 3

Quantitative characteristics of non-profit organizations with statutory tasks in the field of protecting the population and territories from emergencies which took part in emergency response activities (data obtained by the authors)

Год Year	Добровольческие организации, имеющие уставные задачи в области защиты населения и территорий от ЧС, участвовали Volunteer organizations with statutory tasks in the field of protecting the population and territories from emergencies involved									
	в ликвидации ЧС, раз in emergency response, times	в ликвидации последствий ЧС, раз in emergency recovery times	в тушении техногенных пожаров in extinguishing of man-caused fire	в тушении лесных пожаров in extinguishing of wildfires	в тушении иных ландшафтных пожаров in extinguishing of other landscape fires	в рамках участия в ликвидации ЧС и тушении пожаров добровольцами спасено, чел. within the framework of participation in emergency response and firefighting, (people rescued by volunteers)	в оказании адресной помощи и поддержке населению, пострадавшему в результате ЧС и пожаров in providing targeted assistance and support to the population affected by emergencies and fires	в поисково-спасательных операциях in search and rescue operations	в том числе в поиске потерявшихся в природной среде, раз including search for lost persons in the wilderness	Нет данных No data
2019	Более 26 500 Over 26,500	Более 2 тыс. Over 2,000	28 000	244	Более 1,5 тыс. Over 1,500	380	2 000	121	Нет данных No data	Нет данных No data
2020	21 213	12 214	24 312	1 115	66	418	34 000	1,3 млн million	14 849	Нет данных No data

Год Year	Добровольческие организации, имеющие уставные задачи в области защиты населения и территорий от ЧС, участвовали Volunteer organizations with statutory tasks in the field of protecting the population and territories from emergencies involved												
	в ликвидации ЧС, раз in emergency response, times	в ликвидации последствий ЧС, раз in emergency recovery times	в тушении техногенных пожаров in extinguishing of man-caused fire	в тушении лесных пожаров in extinguishing of wildfires	в тушении иных ландшафтных пожаров in extinguishing of other landscape fires	в рамках участия в ликвидации ЧС и тушении пожаров добровольцами спасено, чел. within the framework of participation in emergency response and firefighting, (people rescued by volunteers)	в оказании адресной помощи и поддержке населению, пострадавшему в результате ЧС и пожаров in providing targeted assistance and support to the population affected by emergencies and fires		в поисково-спасательных операциях in search and rescue operations				
							Всего, раз total times	из них потушили самостоятельно, раз of them extinguished independently	Всего, раз total times	помощь и поддержка оказана, чел. assistance and support provided	Всего, раз total times	в том числе в поиске потерявшихся в природной среде, раз including search for lost persons in the wilderness	
2021	24 178	14 980	29 129	3 423	675	85	12 921	2 920	352	5 998	Более 440 тыс. Over 440,000	34 493	8 536
2022	38 639	14 304	27 834	2 707	320	13	18 730	1 608	536	6 927	Более 375 тыс. Over 375,000	41 438	10 138
2023	34 310	11 250	26 150	2 352	341	5	15 582	1 680	364	1 837	Более 281 тыс. Over 281,000	37 595	11 515
2024	22 929	8 935	22 166	2 015	250	3	10 461	1 570	178	8 468	Более 220 тыс. Over 220,000	47 821	14 822

Также были рассмотрены гендерные и возрастные характеристики волонтеров и добровольцев за анализируемый период. Наблюдается устойчивая тенденция к снижению среднего возраста волонтеров до 23 лет и стабилизация соотношения участвующих в деятельности женщин и мужчин

в пропорции 65:35. Динамика изменения возрастного и гендерного состава волонтеров в Российской Федерации представлена в табл. 4. Гендерный состав волонтеров слабо меняется, при этом женщин участвует в волонтерской деятельности примерно в два раза больше, чем мужчин (рис. 2, 3).

Таблица 4
Динамика изменения возрастного и гендерного состава волонтеров в Российской Федерации за 2019–2024 гг. (получено авторами)

Table 4

Dynamics of changes in the age and gender composition of volunteers in the Russian Federation for 2019–2024 (data obtained by the authors)

Год Year	Количество организованных волонтеров, чел. Amount of organized volunteers	Год Year							Средний возраст, лет Average age, years	Пол, % Gender, %	
		до 18 лет under 18	18– 24	25– 34	35– 44	45– 54	55– 64	65+		Женщины Women	Мужчины Men
2024	> 1 740 500	52	20	8	11	6	3	1	23	65	35
2023	> 1 534 180	51	21	9	10	5	2	1	23	66	34
2022	> 1 358 250	41	26	12	12	6	2	1	24	65	35
2021	> 888 290	29	44	10	9	5	3	1	24	70	30
2020	> 911 300	8	39	19	19	10	4	1	30	73	27
2019	> 715 330	12	59	12	7	5	3	2	25	77	23

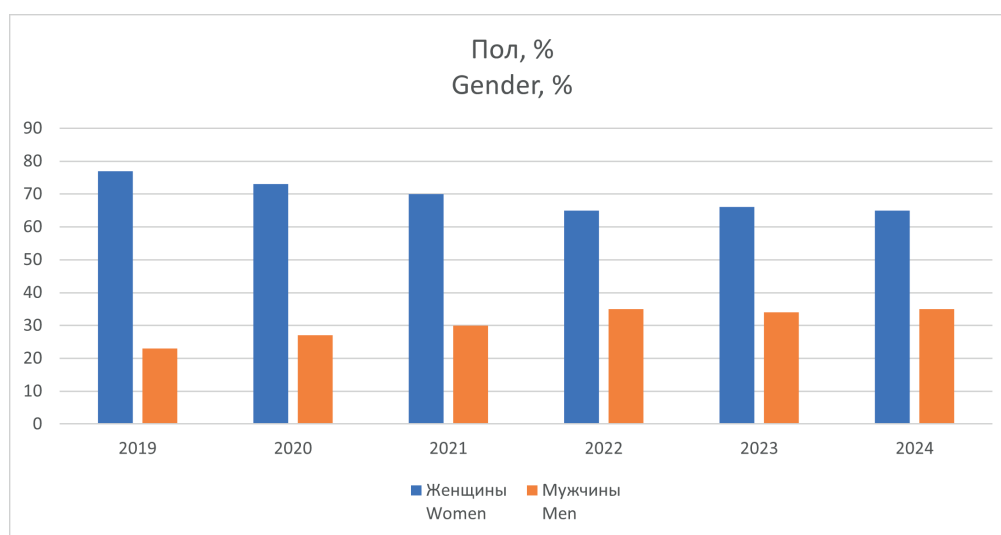


Рис. 2. Динамика изменения гендерного состава волонтеров в Российской Федерации за 2019–2024 гг. (получено авторами)

Fig. 2. Dynamics of changes in the gender composition of volunteers in the Russian Federation for 2019–2024 (data obtained by the authors)

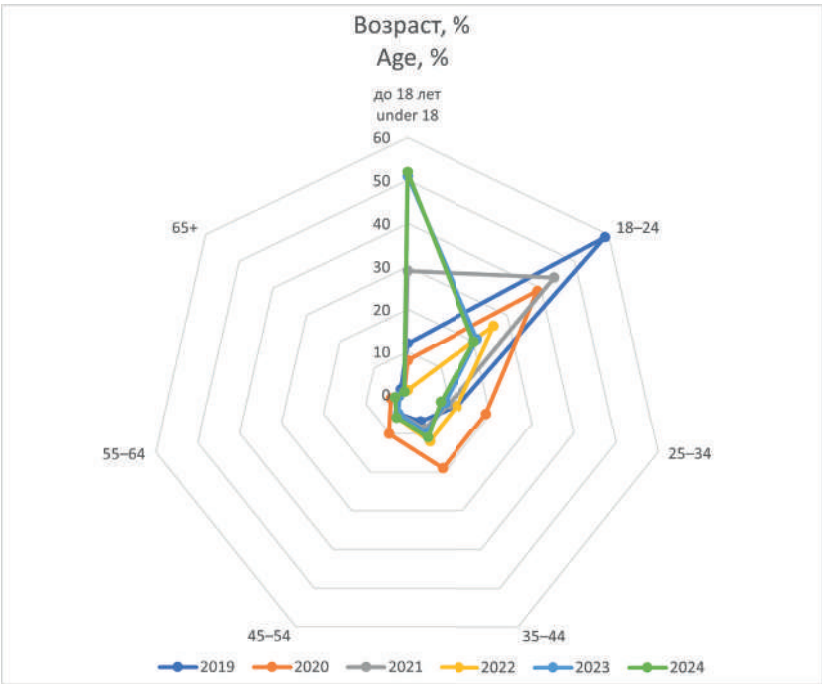


Рис. 3. Динамика изменения возрастного состава волонтеров в Российской Федерации за 2019–2024 гг. (получено авторами)

Fig. 3. Dynamics of changes in the age composition of volunteers in the Russian Federation for 2019–2024 (obtained by the authors)

Проведенный анализ вовлеченности населения субъектов Российской Федерации в добровольческую и волонтерскую деятельность показывает, что во многих регионах сохраняется большой потенциал для

роста и развития волонтерских организаций. Количественные показатели потенциала волонтерского движения в федеральных округах Российской Федерации представлены в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5

Волонтерский потенциал федеральных округов Российской Федерации (получено авторами)

Table 5

Volunteer potential of federal districts of the Russian Federation (data obtained by the authors)

Федеральный округ Federal district	Численность населения, чел. Population number	Количество организованных волонтеров, чел. Organised volunteers, people	Процент вовлеченности населения в добровольческую и волонтерскую деятельность, % Percentage of population involvement in volunteer activities, %	Численность волонтеров и добровольцев, привлеченных к учениям в 2024 г. Number of volunteers involved in the training in 2024		
				при выполнении превентивных мероприятий in implementing preventive measures	при непосредственной угрозе ЧС at the immediate threat of an emergency	при ликвидации ЧС in emergency response
Центральный Central	40 198 659	1 737 159	4,32	1 219	2 166	503

Окончание Таблицы 5

Федеральный округ Federal district	Численность населения, чел. Population number	Количество организованных волонтеров, чел. Organised volunteers, people	Процент вовлеченности населения в добровольческую и волонтерскую деятельность, % Percentage of population involvement in volunteer activities, %	Численность волонтеров и добровольцев, привлеченных к учениям в 2024 г. Number of volunteers involved in the training in 2024		
				при выполнении превентивных мероприятий in implementing preventive measures	при непосредственной угрозе ЧС at the immediate threat of an emergency	при ликвидации ЧС in emergency response
Северо-Западный Northwestern Federal District	13 840 352	511 441	3,70	23	25	25
Южный Southern Federal District	16 624 081	789 096	4,75	6	355	27
Северо-Кавказский North Caucasian Federal District	10 251 083	286 517	2,79	1 642	76	116
Приволжский Volga Federal District	28 540 832	1 357 281	4,76	2 432	2 478	376
Уральский Urals Federal District	12 262 295	394 376	3,22	25	48	0
Сибирский Siberian Federal District	16 567 143	507 943	3,07	0	108	133
Дальневосточный Far Eastern Federal District	7 866 344	318 871	4,05	0	0	153

Анализ количества населения и волонтеров в федеральных округах Российской Федерации свидетельствует о недостаточной вовлеченности общества в волонтерскую и добровольческую деятельность.

Из диаграммы на рис. 5 следует, что в Центральном, Южном и Приволжском федеральных округах волонтерское дви-

жение развито больше, чем в среднем по России. Таким образом, эти регионы Российской Федерации обладают большим ресурсом для привлечения волонтеров и добровольцев к мероприятиям по предупреждению и ликвидации последствий ЧС и работе с пострадавшим населением.



Рис. 4. Количественные показатели потенциала волонтерского движения (получено авторами)

Fig. 4. Quantitative indicators of volunteering potential (data obtained by the authors)



Рис. 5. Показатель потенциала роста волонтерского движения по федеральным округам Российской Федерации (получено авторами)

Fig. 5. DVolunteer movement growth potential indicator by federal districts of the Russian Federation (data obtained by the authors)

В ходе учений МЧС России при отработке практических мероприятий наиболее активно привлекали волонтеров для выполнения задач в Северо-Кавказский, Приволжский и Центральный федеральные округа. Тем не менее наблюдается тенденция низкой вовлеченности волонтеров и добровольцев в ходе проведения учений, что свидетельствует о недостаточности уровня

взаимодействия между волонтерскими организациями, органами местного самоуправления и координационными органами территориальных подсистем РСЧС [9].

Во всех федеральных округах в ходе учений добровольцы (волонтеры) привлекались к отработке практических мероприятий. Основные мероприятия представлены на рис. 6.

Практические мероприятия учений с привлечением добровольцев и волонтеров Activities of the training with the involvement of volunteers	
	Организация эвакуации населения из населенных пунктов Evacuation of population from settlements
	Тушение кромки пожаров ранцевыми огнетушителями Extinguishing fire edges with knapsack extinguishers
	Оцепление места условной чрезвычайной ситуации Secure the site of a contingent emergency
	Организация размещения и оказания первой помощи в пунктах временного размещения Arranging accommodation and first aid in temporary shelter
	Проведение придомовых обходов с целью оповещения населения и помощи в эвакуации Conducting neighbourhood rounds to notify the population and assist in evacuations
	В качестве статистов при отработке учебных вопросов учений As statisticians by practising the training

Рис. 6. Практические мероприятия учений МЧС России с привлечением добровольцев и волонтеров (получено авторами)

Fig. 6. Activities in training of the EMERCOM of Russia involving (data obtained by the authors)

Учения показали, что развитие волонтерского потенциала для ликвидации ЧС является важным аспектом эффективного реагирования на кризисы, требует комплексного подхода и активного вовлечения как волонтеров, так и профессионалов в этой области, а эффективное взаимодействие между волонтерами, организациями

и местными властями является важным пунктом к успешной реализации таких инициатив [10].

Основные этапы организации волонтерской деятельности по оказанию помощи пострадавшему населению
(рис. 7)



Рис. 7. Этапы организации волонтерской деятельности по оказанию помощи пострадавшему населению (получено авторами)

Fig. 7. Stages of organizing volunteer activities to help the affected population (data obtained by the authors)

1. Подготовка и планирование.

- Анализ рисков и потребностей. Первоначальный этап включает оценку возможных рисков и определение потребностей в помощи. Важно заранее определить типы ЧС, которые наиболее вероятны в данной местности, и подготовить соответствующие волонтерские ресурсы [11, 12].
- Создание волонтерских групп. Формируются специализированные команды волонтеров с учетом их навыков и возможностей. Важно проводить регулярные тренинги и учения, чтобы волонтеры были готовы к работе в условиях ЧС.

2. Координация действий.

- Создание единого центра координации. Для эффективного управления волонтерскими ресурсами создается центр, который отвечает за распределение задач, связь с другими службами и контроль за выполнением задач.
- Информационная поддержка. Важно обеспечить оперативный об-

мен информацией между волонтерами, координационным центром и другими задействованными организациями.

3. Реализация волонтерской помощи.

- Доставка гуманитарной помощи. Волонтеры часто занимаются сбором и распределением продуктов питания, медикаментов и других необходимых ресурсов. Важно организовать логистику таким образом, чтобы помощь достигала пострадавших в кратчайшие сроки.
- Оказание психологической поддержки. В условиях ЧС важна не только физическая помощь, но и поддержка психологического состояния пострадавших. Волонтеры, прошедшие специальное обучение, могут предоставлять такую помощь.

4. Оценка и повышение качества работы волонтерской деятельности.

- Анализ проделанной работы. По завершении активной фазы ЧС важно провести оценку эффективности волонтерских программ. Это включает анализ достигнутых результатов,

выявление недостатков и разработку рекомендаций по улучшению.

- Обратная связь. Сбор отзывов от волонтеров и пострадавших помогает понять, какие аспекты работы нужно улучшить и как можно повысить уровень подготовки к будущим ЧС.

Для оперативной работы с населением в случае возникновения ЧС мэру города и председателю КЧС необходимо понимание: кто же такие волонтеры и что они умеют делать. Предлагается выделить следующие уровни подготовки и возможности волонтеров (табл. 6).

Таблица 6
Категории волонтеров (добровольцев) по обученности и уровню подготовки
(получено авторами) [13]

Table 6

Categories of volunteers by training and level of training (data obtained by the authors) [13]

Категория Categorie	Уровень подготовки Level of training	Возможности Opportunities
1	Аттестован на право проведения АСДНР Certified to conduct accident and rescue work and other urgent work	Участие в АСДНР Participation in accident and rescue work and other urgent work
2	Аттестован на право проведения пожарно-спасательных работ Certified to conduct fire and rescue works	Участие в тушении природных и техногенных пожаров Participation in extinguishing of man-made and wild fires
3	Обучен оказанию медицинской помощи Trained to provide medical assistance	Участие в эвакуационных мероприятиях и оказание доврачебной помощи Participation in evacuation and first aid activities
4	Не прошел обучение Didn't receive training	Выполнение хозяйственных работ Doing maintenance work

Для своевременной помощи малоименным группам населения и повышения эффективности деятельности волонтеров необходим обмен положительным опытом между успешными, хорошо зарекомендовавшими себя практиками [14, 15].

Выводы

В результате выполненного статистического анализа можно сделать вывод, что волонтерское движение хотя и имеет тенденцию к снижению, но по-прежнему сохраняет свою актуальность, и в ряде регионов нашей страны представляет серьезную силу и может рассматриваться как существенный потенциал для помощи специальным служ-

бам по реагированию на ЧС и ликвидации последствий ЧС.

В основе проблемы вовлечения населения в волонтерские и добровольческие организации лежат:

- недостаток информации (многие люди готовы принять участие в волонтерской деятельности, но не знают, как это сделать);
- несовершенство нормативной правовой базы (это затрудняет поиск возможностей для профессионального роста и развития добровольцев, вносит сложности в процесс отбора, обучения и мобильности волонтеров);
- неразвитая инфраструктура волонтерских организаций (среди экспертов

часто отмечают недостаточность финансовых и материальных средств (помещений, транспорта и др.), а также сложности с вовлечением населения в социальные проекты и проблемы координации деятельности волонтеров).

Волонтерское движение стало неотъемлемой частью системы реагирования на чрезвычайные ситуации в России и в мире. Оно играет важную роль в мобилизации гражданского общества, предоставлении гуманитарной и психологической помощи, а также в восстановлении пострадавших территорий. Развитие и поддержка волонтерства должны стать приоритетом государственной политики в сфере обеспечения безопасности населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полторанов Д. В. О подготовке и организации волонтерской деятельности по работе с уязвимыми группами населения в условиях крупномасштабных чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21, № 2 (80). С. 81–88.

2. Аюбов Э. Н., Шурыгина К. М. Факторы, влияющие на поведение человека в условиях чрезвычайных ситуаций // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны / сост. В. С. Бутков и др. М., 2022. Ч. IV. С. 65–74.

3. Развитие добровольческой (волонтерской) деятельности в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах / Э. Н. Аюбов [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 3 (77). С. 75–80.

4. Whittaker J., McLennan B., Handmer J. A review of informal volunteerism in emergencies and disasters: Definition, opportunities and challenges // International journal of disaster risk reduction. 2015. Vol. 13. pp. 358–368.

5. Phillips B. D. Disaster Volunteers: Recruiting and Managing People Who Want to Help. Butterworth-Heinemann, 2020.

6. Chen H. Y., Ahmad C. A., Abdullah K. L. The impact of serving in disaster relief among volunteers in Malaysia // Chinese journal of traumatology. 2021. Vol. 24, № 4. pp. 237–248.

7. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii> (дата обращения: 26.02.2025).

8. Добровольчество (волонтерство) в МЧС России // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://clck.ru/3P8Zwh> (дата обращения: 26.02.2025).

9. Российский статистический ежегодник // Федеральная служба государственной статистики : офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 04.09.2025).

10. Деятельность территориальных органов МЧС России по организации взаимодействия и привлечения добровольцев, добровольческих организаций к выполнению задач в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах в 2022 году : информационно-справочный бюллетень / Э. Н. Аюбов [и др.]. М., 2023. 129 с.

11. Аюбов Э. Н. Волонтерство в России // Деятельность волонтерских организаций в области обеспечения безопасности населения в чрезвычайных ситуациях : сб. мат. международной научной конференции. М., 2024. С. 65–72.

12. Крапухин В. В. Вопросы устойчивости и уязвимости населения в чрезвычайных ситуациях // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 3 (77). С. 81–86.

13. Крапухин В. В. Поддержка уязвимых групп населения в чрезвычайных ситуациях // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19, № 2 (72). С. 69–73.

14. Полторанов Д. В., Арефьева Е. В. Волонтерская помощь маломобильным группам населения в условиях чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21, № S2. С. 67–73.

15. Арефьева Е. В. Международный опыт, методический инструментарий оценки устойчивости и его адаптация к российским реалиям // Устойчивость городов в аспекте климатических изменений: проблемы и пути решения : сб. докладов панельной дискуссии (круглого стола) в рамках III Международного пожарно-спасательного конгресса МЧС России. М., 2022. С. 46–54.

16. Арефьева Е. В., Лаврусевич А. А., Крапухин В. В. Международные подходы и инициативы в области повышения устойчивости урбанизированных территорий в чрезвычайных ситуациях // Проблемы обеспечения экологической безопасности, мониторинга окружающей среды и прогнозирования чрезвычайных ситуаций : мат. Всероссийской научно-практической конференции. М., 2024. С. 15–26.

REFERENCES

1. Poltoranov D. V. On volunteer activities preparation and management to work with vulnerable groups of the population in conditions of large-scale emergencies // Civil security technology. 2024. Vol. 21, № 2 (80) pp. 81–88.

2. Ayubov E. N., Shurygina K. M. Factors affecting human behavior in emergency situations // Civil Defense guarding peace and security : materials of the VI International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day. M., 2022. Part IV. pp. 65–74.

3. Development of volunteer (volunteer) activities in the field of protecting the population and territories from emergency situations, ensuring fire safety and human safety at water bodies / E. N. Ayubov et al. // Civil security technologies. 2023. Vol. 20, № 3 (77). pp. 75–80.

4. Whittaker J., McLennan B., Handmer J. A review of informal volunteerism in emergencies and disasters: Definition, opportunities and challenges // International journal of disaster risk reduction. 2015. Vol. 13. pp. 358–368.

5. Phillips B. D. Disaster Volunteers: Recruiting and Managing People Who Want to Help. Butterworth-Heinemann, 2020.

6. Chen H. Y., Ahmad C. A., Abdullah K. L. The impact of serving in disaster relief among volunteers in Malaysia // Chinese journal of traumatology. 2021. Vol. 24, № 4. pp. 237–248.
7. State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies // The Russian Ministry of Emergency Situations : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii> (date of application: 02.26.2025).
8. Volunteering (volunteering) in the EMERCOM of Russia // The Russian Ministry of Emergency Situations : official website. URL: <https://clck.ru/3P8Zwh> (date of application: 26.02.2025).
9. Russian Statistical Yearbook // Federal State Statistics Service : official website. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (date of application: 04.09.2025).
10. The activities of the territorial bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia in organizing cooperation and attracting volunteers and volunteer organizations to perform tasks in the field of protecting the population and territories from emergencies, ensuring fire safety and human safety on water bodies in 2022 : Information and reference bulletin / E. N. Ayubov et al. M., 2023. 129 p.
11. Ayubov E. N. Volunteering in Russia // Activities of volunteer organizations in the field of public safety in emergency situations : Proceedings of the international scientific conference. M., 2024. pp. 65–72.
12. Krapukhin V. V. Issues of the population resilience and vulnerability in emergency situations // Civil security technology. 2023. Vol. 20, № 3 (77). pp. 81–86.
13. Krapukhin V. V. Supporting vulnerable groups in emergency situations // Civil security technology. 2022. Vol. 19, № 2 (72). pp. 69–73.
14. Poltoranov D. V., Arefyeva E. V. Volunteer assistance to the people with limited mobility in emergency situations. Civil security technologies. 2024. Vol. 21, № S2. pp. 67–73.
15. Arefyeva E. V. International experience, methodological tools for assessing sustainability and adapting it to Russian realities // Urban sustainability in the aspect of climate change : problems and solutions: A collection of reports from the panel discussion (round table) within the framework of the III International Fire and Rescue Congress of the EMERCOM of Russia. M., 2022. pp. 46–54.
16. Arefyeva E. V., Krapukhin V. V., Lavrusevich A. A. International approaches and initiatives to increase the sustainability of urbanized territories in emergency situations // Problems of ensuring environmental safety, environmental monitoring and forecasting of emergency situations : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. M., 2024. pp. 15–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полторанов Денис Владимирович, соискатель ученой степени канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 3885-2179; e-mail: depo768@rambler.ru

Арефьева Елена Валентиновна, д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва,

ул. Давыдовская, д. 7); профессор кафедры промышленной и экологической безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10); SPIN-код: 2738-6323; e-mail: elaref@mail.ru

Кузнецова Таисия Дмитриевна, научный сотрудник научно-исследовательского центра ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (121352, Российская Федерация, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7); SPIN-код: 8567-6900; e-mail: kuznetcovatd@vniigochs.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Poltoranov, Researcher, Research Department, Cand. Sci. (Eng.), All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies (federal science and high technology center) VNII GOCHS (FC), (7 Davydkovskaya str., Moscow 121352, Russian Federation); SPIN-scientific: 3885-2179; SPIN code: 3885-2179; e-mail: depo768@rambler.ru

Elena V. Arefieva, Dr., Associate Professor, ch. n. s. scientific research center of the All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies (federal science and high technology center) VNII GOCHS (FC) (7 Davydkovskaya str., Moscow 121352, Russian Federation); Professor of the Department of Industrial and Environmental Safety of the Kazan National Research Technical University named after. A. N. Tupolev (10 K. Marx, Kazan 420111, Russian Federation). SPIN code: 2738-6323; e-mail: elaref@mail.ru

Taisiya D. Kuznetsova, Researcher, Research Department, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies (federal science and high technology center) VNII GOCHS (FC), (7 Davydkovskaya str., Moscow 121352, Russian Federation); SPIN-scientific: 8567-6900; e-mail: kuznetcovatd@vniigochs.ru

Поступила в редакцию 19.06.2025
Одобрена после рецензирования 12.08.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.841.42

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ ОТ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РЕГИОНАХ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Холопцев Александр Вадимович^{1,2}, Шубкин Роман Геннадьевич¹, Бабенышев Сергей Валерьевич¹

¹ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Севастопольское отделение, г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация. Значительная часть общего количества ландшафтных пожаров, возникающих в том или ином месяце на территории России, приходится на ее азиатскую часть. Поэтому выявление значимых природных факторов межгодовых изменений указанного показателя для расположенных здесь регионов — актуальная проблема безопасности при чрезвычайных ситуациях. Выдвинута гипотеза о существовании регионов, где к числу таких факторов для некоторых месяцев пожароопасного сезона относятся вариации среднемесячных потоков суммарной солнечной радиации, поступающей на их территории. Установлено, что эта гипотеза справедлива для Республики Саха (Якутия), Красноярского края, Иркутской области, Ямало-Ненецкого, Чукотского и Ханты-Мансийского автономных округов. Выявленная закономерность обусловлена наличием значимой и положительной корреляции межгодовых вариаций упомянутых потоков с синхронными по отношению к ним изменениями среднемесячных температур приземного слоя атмосферы над территориями перечисленных регионов, которые по условиям погоды являются одним из факторов пожароопасности. За период 1976–2023 гг. потоки суммарной солнечной радиации для большинства месяцев пожароопасного сезона, поступающей на всю азиатскую часть России, а также на территории каждого из указанных регионов, значимо возросли, что привело к существенному потеплению их регионального климата. В период 2000–2023 гг. средние скорости увеличения этих потоков наиболее существенно повысились в регионах, относящихся к Дальневосточному федеральному округу. При дальнейшем их увеличении потепление климата выявленных регионов продолжится, а пожароопасность по условиям погоды на соответствующих территориях возрастет.

Ключевые слова: азиатская часть России, количество ландшафтных пожаров, поток суммарной солнечной радиации, среднемесячная температура воздуха, корреляция, тенденция

Для цитирования: Холопцев А. В., Шубкин Р. Г., Бабенышев С. В. Зависимость изменения количества ландшафтных пожаров от вариаций потоков суммарной солнечной радиации в регионах азиатской части России // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 135–150.

DEPENDENCE OF CHANGES IN THE NUMBER OF LANDSCAPE FIRES ON VARIATIONS IN TOTAL SOLAR RADIATION FLOWS IN THE REGIONS OF THE ASIAN PART OF RUSSIA

Alexander V. Kholoptsev^{1,2}, Roman G. Shubkin¹, Sergey V. Babenyshev¹

¹ Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

² Sevastopol Branch of the State Oceanographic Institute named after N. N. Zubov, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. A significant part of the total number of wildfires occurring in a given month on the territory of Russia falls on its Asian part. Therefore, the identification of significant natural factors of interannual changes in this indicator for these regions is an important problem of safety in emergencies. The authors check the hypothesis that there are regions where such factors, for some months of the fire-hazardous season, include variations in the average monthly fluxes of total solar radiation over their territories. It is established that this hypothesis is true for the Republic of Sakha (Yakutia), Krasnoyarsk Krai, Irkutsk Oblast, Yamalo-Nenets, Chukotka and Khanty-Mansi Autonomous Okrugs. The revealed regularity is caused by the presence of a significant and positive correlation of interannual variations of the mentioned fluxes with synchronous, in relation to them, changes in the average monthly temperatures of the surface layer of the atmosphere over the territories of the considered regions, which are one of the factors of increasing fire danger. For the period 1976-2023 yrs., the fluxes of total solar radiation for most months of the fire-hazardous season, coming to the entire Asian part of Russia, as well as to the territory of each of the specified regions, increased significantly, which led to a significant warming of their regional climate. In the period 2000-2023 yrs., the average rates of increase of these fluxes grew most significantly in the regions related to the Far Eastern Federal District. With their further increase, the warming of the climate of the identified regions will continue, and the forest fires risks caused by the weather conditions in the corresponding territories will increase.

Keywords: Asian part of Russia, wildfires, total solar radiation flux, average monthly air temperature, correlation, trend

For Citation: Kholoptsev A. V., Shubkin R. G., Babenyshev S. V. Dependence of changes in the number of landscape fires on variations in total solar radiation flows in the regions of the Asian part of Russia // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 135–150.

Введение

Количество ландшафтных пожаров (далее — КЛП), возникающих за тот или иной месяц на некоторой территории, — важный показатель соответствующего ему пожар-

ного риска. Поэтому выявление природных процессов, являющихся значимыми причинами увеличения этого показателя в том или ином регионе мира, — актуальная проблема физической географии и безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Наибольший интерес ее решение представляет для регионов, обладающих значительными лесными ресурсами и сравнительно мало населенных, т. к. значимость влияния природных факторов на динамику соответствующего им КЛП является повышенной. В России к их числу относятся регионы, расположенные на ее азиатской территории (далее — АТР).

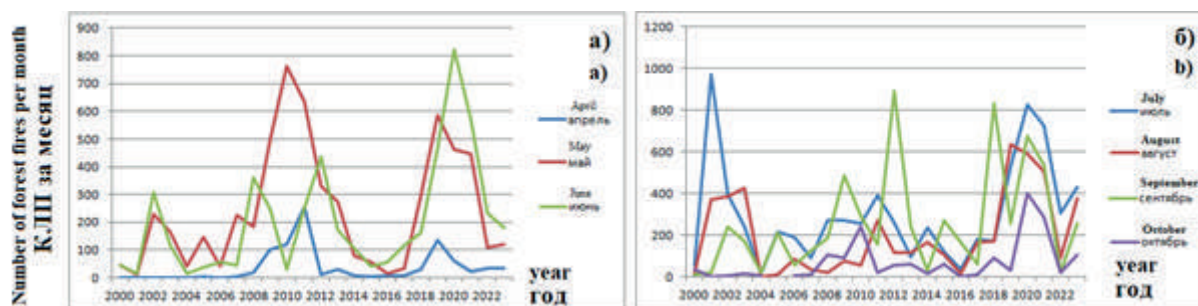


Рис. 1. Межгодовые изменения КЛП на территории Республики Саха (Якутия) в период 2000–2023 гг. (по данным [2]) для месяцев: а) апрель — июнь; б) июль — октябрь

Fig. 1. Interannual changes in the number of wildfires in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) in the period 2000–2023 (according to [2]) for the months: a) April — June; b) July — October

Как видно из рис. 1, максимальные и минимальные значения КЛП на территории Якутии для всех месяцев пожароопасного сезона различаются в десятки-сотни раз, что существенно усложняет адекватное планирование деятельности противопожарных подразделений, на которые возложена задача их ликвидации. Следовательно, выявление природных факторов, вызывающих подобную динамику изучаемого показателя, представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Решению рассматриваемой проблемы для различных регионов АТР посвящены работы многих отечественных авторов [1, 3–6]. Ими установлено, что к числу значимых причин квазицикличности межгодовых изменений КЛП относятся особенности процессов накопления на лесопокрытых территориях горючего материала [1, 7], а также вариаций на них пожароопасности

Установлено [1], что межгодовые изменения КЛП на территории любого из регионов АТР в период 2000–2023 гг. представляли собой сложные колебания, наложенные на те или иные линейные тренды. Как пример, на рис. 1 показаны межгодовые изменения КЛП на территории Республики Саха (Якутия) для различных месяцев пожароопасного сезона, отображенные согласно информации из [2].

по условиям погоды [8, 9] и повторяемости гроз [10, 11].

Существенной причиной изменений пожароопасности по условиям погоды являются вариации среднемесячной температуры воздуха приземного слоя атмосферы (СТВ), которая определяет интенсивность испарения влаги из горючего материала [6, 8, 12]. Поэтому значимое влияние на ее динамику оказывает потепление местного климата.

Повышение СТВ, наряду с усилением парникового эффекта и другими глобальными факторами [13, 14], может быть вызвано и соответствующими вариациями среднемесячных потоков суммарной солнечной радиации (далее — ПСР), поступающей на изучаемую местность [12, 15].

Мониторинг изменчивости этих потоков на территории регионов АТР осуществляют функционирующие в них подразделения Главной геофизической обсерватории

им. А. И. Воейкова. Полученные ими результаты представлены в [16] и учитываются при разработке глобального атмосферного реанализа ERA5 [17, 18].

Существующие представления о роли солнечной радиации в формировании температурных режимов различных регионов мира [14, 19] позволяют предположить, что на территории некоторых из них значимой причиной межгодовых изменений КЛП для каких-либо месяцев пожароопасного сезона являются вариации соответствующих им ПСР. Выявление таких регионов позволило бы учесть результаты мониторинга ПСР, поступающих на их территории, при разработке для них прогнозов пожароопасности по условиям погоды.

Тем не менее ранее регионы АТР, где межгодовые изменения ПСР для каких-либо месяцев пожароопасного сезона значимо связаны с вариациями соответствующего им КЛП, выявлены не были. Не анализировались и соответствующие им тенденции межгодовых изменений ПСР. С учетом этой информации целью работы стало выявление регионов АТР, для которых выдвинутая гипотеза для каких-либо месяцев пожароопасного сезона является справедливой, а также определение соответствующих им тенденций межгодовых изменений ПСР.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выявлены участки АТР, где межгодовые изменения ПСР, соответствующие тем или иным месяцам пожароопасного сезона, значимо связаны с синхронными вариациями КЛП в каких-либо относящихся к ней регионах России.
2. Проведена оценка за 1976–2023 гг. тенденций межгодовых изменений ПСР, поступающих на выявленные участки.

3. Проведена за тот же период оценка значимости корреляции межгодовых изменений ПСР с вариациями СТВ на различных участках АТР, а также тенденций межгодовых изменений СТВ.

Материалы и методы

Для решения указанных задач как фактический материал об изменениях КЛП для тех или иных месяцев пожароопасного сезона, происходивших на территориях различных регионов России, относящихся к АТР, использована информация [2]. Упомянутые сведения охватывают период 2000–2023 гг.

Как фактический материал о вариациях ПСР и СТВ на различных участках территории Сибири использована информация о среднечасовых значениях этих показателей, представленная в реанализе ERA5 [18]. Допустимость использования упомянутой информации для решения поставленных задач подтверждена путем ее тестирования с использованием результатов фактических измерений, представленных в [16, 20].

С использованием упомянутых сведений для всех участков АТР и для каждого месяца за период январь 1976 — декабрь 2023 гг. вычислены значения ПСР и СТВ, из которых сформированы одноименные временные ряды.

При решении первой задачи изучены статистические связи между изменениями КЛП для каждого месяца пожароопасного сезона на территории того или иного региона России, относящегося к АТР, а также синхронными вариациями ПСР на всех рассматриваемых участках АТР. Решение о значимости этих связей принималось, если достоверность такого статистического вывода (оцененная по критерию Стьюдента за период 2000–2023 гг.)

составляла не менее 95 %. Поэтому задача решалась с применением метода корреляционного анализа. Перед его осуществлением в сопоставляемых рядах за указанный период скомпенсированы линейные тренды.

Пороговый уровень модуля коэффициента корреляции, соответствующий указанной достоверности, определен с учетом количества степеней свободы сопоставляемых рядов. Поскольку это количество оказалось равно 24, упомянутый уровень составил 0,42.

При решении второй и третьей задачи было принято допущение о том, что отклонения рассматриваемых значений ПСР и СТВ от соответствующих линейных трендов — случайные величины с нормальным законом распределения вероятностей. Его корректность подтверждена применением критерия Пирсона (теста нормальности).

При решении второй задачи участки территории Сибири, для которых тенденции изучаемых процессов являлись значимыми, определялись для отрезков временных рядов ПСР, соответствующих периодам 1976–1999 гг. и 2000–2023 гг.

Решение о значимости выявленной тенденции межгодовых изменений ПСР на каждом из этих отрезков продолжительностью 24 года принималось, если выполнялось условие:

$$24\text{УКЛТ} > 1,65\text{СКО},$$

где УКЛТ — угловой коэффициент линейного тренда рассматриваемого временного ряда;

СКО — среднеквадратическое отклонение значений ПСР от соответствующего линейного тренда.

При решении третьей задачи решение о значимости тенденции межгодовых изменений СТВ за период 1976–2023 гг.

принималось, если справедливым являлось неравенство:

$$64\text{УКЛТ} > 1,65\text{СКО}.$$

При оценке значимости связей между временными рядами ПСР и СТВ за тот же период применен метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента, 99-процентный порог значимости корреляции определен как 0,4.

Как следует из изложенного, методика исследования позволяет решить все поставленные задачи. При этом методика тестирования нормальности выборок изучаемых случайных процессов, содержащих малое количество членов, не позволяет гарантировать высокую достоверность получаемых результатов. Поэтому результаты исследования рекомендуется рассматривать как носящие качественный характер.

Результаты

С применением изложенной методики для каждого месяца пожароопасного сезона определены все участки АТР, для которых межгодовые изменения в 2000–2023 гг. ПСР значимо связаны с синхронными вариациями КЛП, соответствующего каждому ее региону.

Как пример, на рис. 2 представлены участки АТР, где в период 2000–2023 гг. корреляция межгодовых изменений соответствующих им ПСР, а также синхронных вариаций КЛП для некоторых месяцев пожароопасного сезона являлась значимой. Здесь и далее обозначены:

1 — Ненецкий автономный округ, 2 — Республика Коми, 3 — Ямало-Ненецкий автономный округ, 4 — Ханты-Мансийский автономный округ, 5 — Свердловская область, 6 — Челябинская область, 7 — Курганская

область, 8 — Тюменская область, 9 — Омская область, 10 — Новосибирская область, 11 — Томская область, 12 — Кемеровская область, 13 — Алтайский край, 14 — Республика Хакасия, 15 — Таймырский Долгано-Ненецкий район Красноярского края, 16 — Республика Саха (Якутия), 17 — Эвенкийский район Красноярского края, 18 — другие районы Красноярского края, 19 — Республика Алтай,

20 — республика Тыва, 21 — Иркутская область, 22 — Республика Бурятия, 23 — Забайкальский край, 24 — Амурская область, 25 — Хабаровский край, 26 — Магаданская область, 27 — Чукотский автономный округ, 28 — Камчатский край, 29 — Сахалинская область, 30 — Казахстан, 31 — Монгольская Народная республика, 32 — Китайская Народная республика.

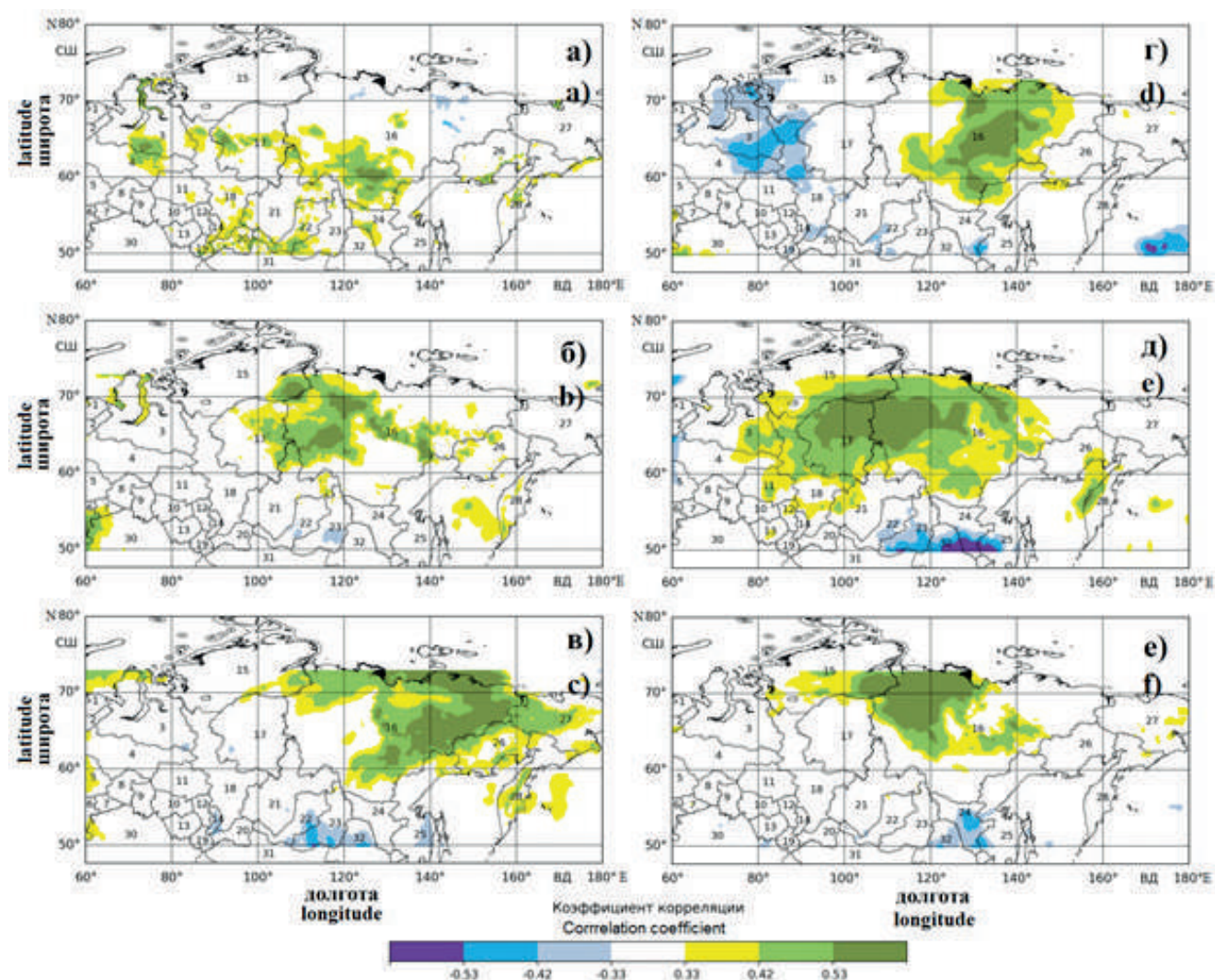


Рис. 2. Участки АТР, где в период 2000–2024 гг. корреляция межгодовых изменений КЛП и синхронных по отношению к ним вариаций ПСР значима для месяцев: а) апрель; б) май; в) июнь; г) июль; д) август; е) сентябрь

Fig. 2. Areas of the Asian Territory of Russia where, in the period 2000–2024 yrs., the correlation of interannual changes in the number of wildfires and synchronous variations in the solar radiation fluxes is significant for the months: а) April; б) May; в) June; д) July; е) August; е) September

Из рис. 2б–е видно, что участки АТР, на которых межгодовые изменения ПСР для всех месяцев с мая по сентябрь значимо связаны с синхронными вариациями КЛП, расположены в основном на территории Якутии. Для многих из этих участков достоверность вывода о значимости рассматриваемых связей превышает 99 % (порог значимости 0,53).

Для апреля (рис. 2а), а также октября (которые для многих районов (улусов) Якутии не относятся к пожароопасному сезону) суммарная площадь участков АТР, для которых изучаемые связи значимы, существенно меньше, а многие из них расположены в других регионах АТР.

Таким образом, участки АТР, где в период 2000–2023 гг. корреляция между межгодовыми изменениями ПСР и вариациями КЛП для всех месяцев пожароопасного сезона являлась значимой, в основном располагаются непосредственно на территории Якутии. Значимая корреляция временных рядов КЛП и ПСР на участках АТР, относящихся к Якутии всюду положительна. Поэтому с достоверностью не менее 95 % вариации ПСР, поступающих на выявленные участки, являются значимым фактором межгодовых изменений КЛП в Якутии, что подтверждает справедливость выдвинутой гипотезы.

При решении второй задачи для каждого месяца определены участки АТР, где в периоды времени 1976–1999 гг. и 2000–2023 гг. с применением изложенной методики были выявлены те или иные значимые тенденции межгодовых изменений ПСР. Установлено, что для каждого периода времени и каждого месяца на АТР существовали

как участки, где ПСР значимо увеличивались, так и участки, где этот показатель значимо снижался.

Зависимости от месяца долей общей площади участков АТР, где показатель ПСР в периоды 1976–1999 гг. и 2000–2023 гг.: а) значимо снижался (N-); б) значимо повышался (N+); в) значения разности $M = (N+) - (N-)$, — приведены на рис. 3.

Из рис. 3 понятно, что на АТР существовали многочисленные участки, где ПСР в периоды 1976–1999 гг. и 2000–2024 гг. как значимо повышались, так и значимо снижались.

В оба периода времени для всех месяцев, кроме марта (2000–2024 гг.) и сентября (1976–1999 гг.), доли общей площади АТР, приходящиеся на участки, где ПСР возрастали, были значительно больше, чем аналогичные показатели для участков, где ПСР снижались.

Темпы увеличения N+ в период 2000–2023 гг. существенно повысились в сравнении с 1976–1999 гг. для июня и сентября. Значимо снизились они лишь для марта.

Как видно из рис. 3, в среднем за год показатель ПСР, поступающих на АТР, за период 1976–2023 гг. существенно увеличился. Повысилась за 2000–2023 гг. и средняя скорость этого процесса, что внесло соответствующий вклад в потепление регионального климата, а также повышение пожароопасности по условиям погоды.

С использованием изложенной методики для каждого месяца пожароопасного сезона определены участки АТР, где за 1976–1999 гг. и 2000–2023 гг. преобладали те или иные значимые тенденции межгодовых изменений ПСР.

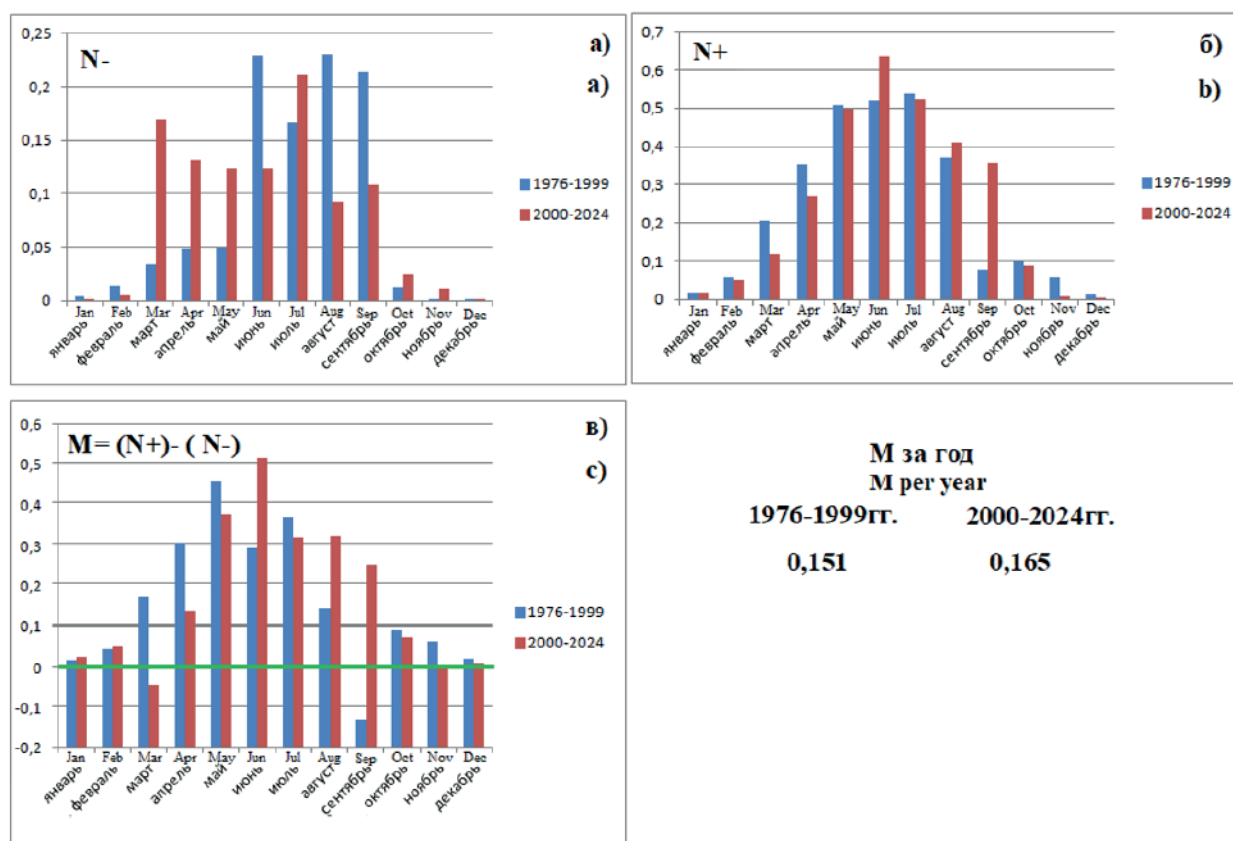


Рис. 3. Доли общей площади участков АТР, где в периоды 1976–1999 гг. и 2000–2024 гг. показатель ПСР: а) значительно снижался (N-); б) значительно повышался (N+); в) значения разности $M = (N+) - (N-)$

Fig. 3. Shares of the total area of the Asia territory of Russia, where solar radiation flux in the periods 1976–1999 yrs. and 2000–2024 yrs.: а) significantly decreased (N-); б) significantly increased (N+); с) the difference $M = (N+) - (N-)$

Как пример, на рис. 4 отображены участки АТР, где для месяцев с апреля по июнь на изучаемых отрезках времени преобладали те или иные значимые тенденции межгодовых изменений ПСР.

Из рис. 4а и 4б следует, что участки, где ПСР для апреля в период 1976–2023 гг. значительно повышаются с наибольшей скоростью (более 4 000 Дж/м²·год), преобладают в южной части территории Сибири. При этом суммарная пло-

щадь таких участков в 2000–2023 гг. оказалась несколько меньше, чем в 1976–1999 гг.

Рис. 4в и 4г показывают, что в период 1976–1999 гг. участки, где ПСР для мая значительно повышались, преобладали в южной части АТР. В период 2000–2023 гг. количество таких участков на юге АТР существенно уменьшилось, однако на севере Красноярского края и в Ямало-Ненецком автономном округе оно значительно возросло.

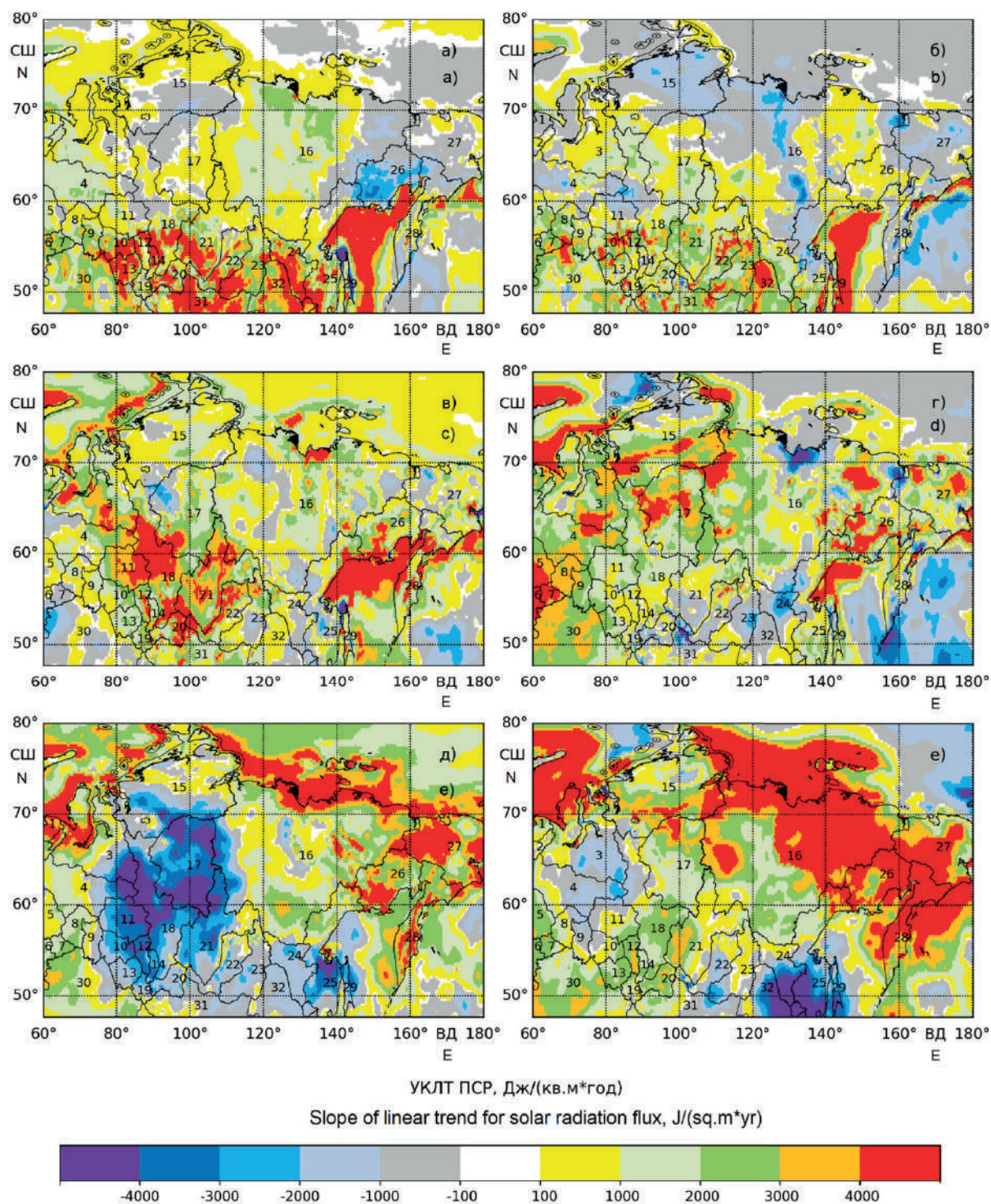


Рис. 4. Участки АТР, где в 1976–1999 гг. и 2000–2023 гг. преобладали значимые тенденции межгодовых изменений ПСР для месяцев: а) апрель (1976–1999 гг.); б) апрель (2000–2023 гг.); в) май (1976–1999 гг.); г) май (2000–2023 гг.); д) июнь (1976–1999 гг.); е) июнь (2000–2023 гг.)

Fig. 4. Regions of Asian territory of Russia where significant trends in interannual changes in the solar radiation fluxes prevailed in 1976–1999 yrs. and 2000–2023 yrs. the months: a) April (1976–1999 yrs.); b) April (2000–2023 yrs.); c) May (1976–1999 yrs.); d) May (2000–2023 yrs.); e) June (1976–1999 yrs.); f) June (2000–2023 yrs.)

При этом на территории Булунского и Усть-Янского улусов (районов) Якутии за 1976–1999 гг. показатель ПСР значительно повысился, а за 2000–2023 гг. значительно снизился.

Как видно из рис. 4*д* и 4*е*, участки АТР, где ПСР для июня в оба изучаемых периода значительно повышалась, преобладали на севере территории Якутии, Ямало-Ненецкого и Чукотского автономных округов. В то же время на территориях Красноярского и Хабаровского краев наблюдались противоположные тенденции.

В 2000–2023 гг. суммарная площадь участков территории Якутии, где ПСР значительно повышались — со скоростью более 4 000 Дж/(м²·год) — по сравнению с 1976–1999 гг., значительно увеличилась. На территории Хабаровского, Приморского края и Амурской области в 2000–2023 гг. существенно возросла площадь участков, где ПСР с такой же скоростью снижались.

В то же время на территории Красноярского края участков, где ПСР значительно снижались — со скоростью не менее 2 000 Дж/(м²·год) — в указанный период не выявлено, а на территориях Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов их суммарная площадь существенно уменьшилась.

Аналогичным образом установлено, что для июля суммарные площади участков АТР, где ПСР значительно снижались, в 2000–2023 гг. наиболее существенно увеличились, по сравнению с 1976–1999 гг. на территории Якутии и Чукотского автономного округа.

Общая площадь участков, где средняя скорость изменений ПСР для июля значительно повысилась, в 2000–2023 гг. возросла на территории Красноярского края, Ямало-Ненецкого автономного округа, но снизилась в Иркутской и Томской областях, а также в Ханты-Мансийском автономном округе. Для августа и в особенности для сентября суммарные площади участков АТР, где ПСР значительно повысились, возросли в Ханты-Мансийском автономном округе, Якутии, Красноярском и Хабаровском краях.

При решении третьей задачи для всех месяцев пожароопасного сезона выявлены участки АТР, где за период современного потепления климата (1976–2023 гг.) СТВ значительно повысилась. Как пример, на рис. 5 показаны участки АТР, соответствующие месяцам с апреля по июнь.

Из рис. 5 очевидно, что за период современного потепления климата значения СТВ для рассматриваемых месяцев, соответствующие всем участкам АТР, значительно увеличились, что подтверждает справедливость выводов [21, 22].

Наиболее существенным потепление климата АТР было в ее Арктической зоне для июня, которому соответствуют максимальные средние значения ПСР на всех широтах Северного полушария.

Как следует из сравнения рис. 5*в* с рис. 4*д* и 4*е*, расположения участков АТР, где для июня за период современного потепления глобального климата произошло наиболее существенное повышение СТВ, а также наибольшее увеличение ПСР, во многом совпадают.

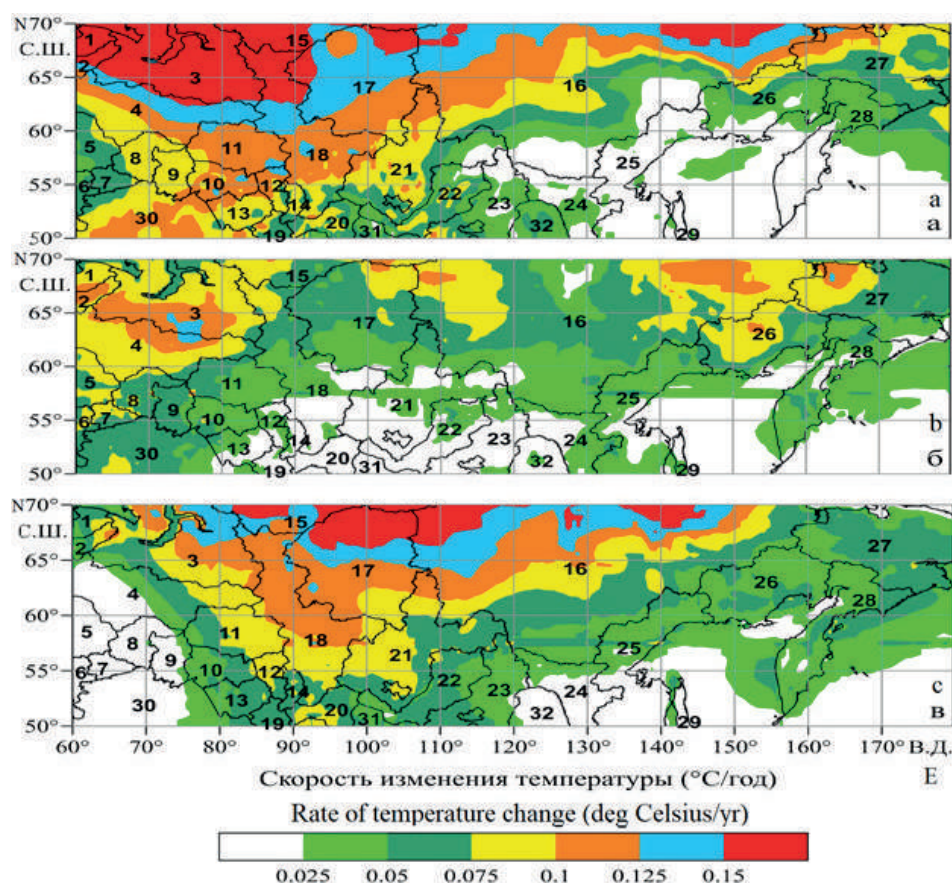


Рис. 5. Участки АТР, где средняя скорость повышения СТВ за 1976–2023 гг. превышала тот или иной уровень для месяцев: а) апрель; б) май; в) июнь

Fig. 5. Regions of the Asian territory of Russia where the average rate of increase in average monthly air temperatures for 1976–2023 yrs. exceeded a certain level, for the months: a) April; b) May; c) June

На рис. 6 представлены участки АТР, для которых корреляция межгодовых изменений ПСР для месяцев с апреля по июнь с синхронными по отношению к ним вариациями СТВ является значимой.

Как следует из рис. 6, для рассматриваемых месяцев корреляция межгодовых изменений ПСР с синхронными вариациями СТВ является значимой практически на всех участках АТР, на которых отсутствует снежный покров. Аналогичные выводы получены и для месяцев с июля по октябрь. Из этого следует, что на всей АТР для месяцев с мая по сентябрь межгодовые изменения ПСР являются значи-

мыми факторами СТВ, а значит и пожароопасности по условиям погоды, и КЛП.

Следовательно, при дальнейшем увеличении ПСР, поступающих на территории выявленных регионов АТР, одним из вероятных является сценарий будущего, при котором СТВ для месяцев с мая по сентябрь в тех же регионах увеличится. Вопрос о причинах выявленного увеличения ПСР на АТР нуждается в дополнительном изучении.

Таким образом, справедливость выдвинутой гипотезы подтверждена, все поставленные задачи решены, а цель исследования достигнута.

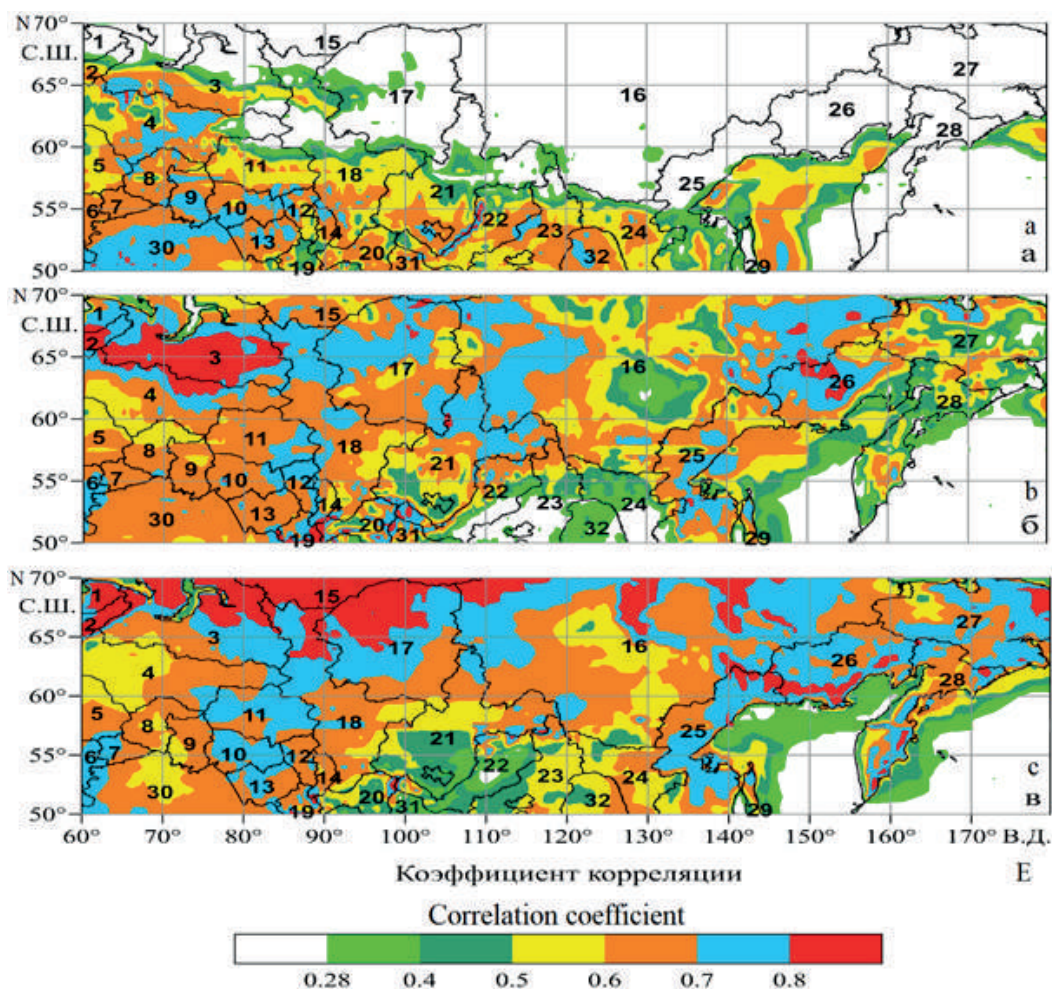


Рис. 6. Участки АТР, где корреляция межгодовых изменений СТБ с синхронными вариациями ПСР за 1976–2023 гг. являлась значимой и положительной для месяцев: а) апрель; б) май; в) июнь

Fig. 6. Regions of the Asian territory of Russia where the correlation of interannual changes in average monthly air temperature of the surface layer of the atmosphere with synchronous variations in average monthly fluxes of total solar radiation for 1976–2023 yrs. was significant and positive for the months: a) April; b) May; c) June

Дискуссия

Из полученных результатов следует, что они в полной мере соответствуют существующим представлениям об изменениях температурного режима различных участков АТР, произошедших за период современного потепления климата [21, 22]. Они также подтверждают справедливость выводов о роли в этих процессах вариаций потоков суммарной солнечной радиации [12, 15], а также о значимых факторах пожароопасности по условиям погоды на АТР [3, 4, 6, 8]. Вместе с тем некоторые установленные

факты обладают существенной научной новизной.

К ним относятся:

- 1) расположение участков АТР, где межгодовые изменения ПСР значимо и положительно коррелированы с синхронными вариациями КЛП на территориях Якутии и других регионов АТР;
- 2) к числу факторов потепления климата АТР для месяцев пожароопасного сезона в период 1976–2023 гг. относилось увеличение средних по этой территории ПСР;
- 3) расположение участков АТР, на которых межгодовые изменения ПСР

для месяцев пожароопасного сезона в тот же период были значимо связаны с синхронными вариациями СТВ, и при этом в обоих процессах присутствовали значимые возрастающие тренды.

Выводы

Таким образом, в статье установлено:

1) значимым фактором межгодовых изменений количества ландшафтных пожаров, возникающих в том или ином месяце пожароопасного сезона на территориях Республики Саха (Якутия), Красноярского края, Иркутской области, Ямало-Ненецкого, Чукотского и Ханты-Мансийского автономных округов в период 1976–2023 гг. являлись синхронные по отношению к ним вариации потоков суммарной солнечной радиации, поступающей на эти территории;

2) причиной этого является наличие значимой положительной корреляции межгодовых вариаций этих потоков с синхронными изменениями среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы над такими территориями;

3) при дальнейшем увеличении потоков суммарной солнечной радиации, поступающей на территории рассмотренных регионов азиатской территории России, в указанных регионах вероятно увеличение пожароопасности по условиям погоды, а также количества возникающих ландшафтных пожаров;

4) актуальной проблемой безопасности при чрезвычайных ситуациях является выявление причин увеличения потоков суммарной солнечной радиации, поступающей в месяцы пожароопасного сезона на территории регионов азиатской территории России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шубкин Р. Г., Ширинкин П. В. Результаты долгосрочного прогнозирования крупномасштабных лесных пожаров в Байкальском регионе // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2016. № 3. С. 35–38. URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v3/N3_9-12.pdf (дата обращения: 25.01.2025).

2. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства : офиц. сайт. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 25.01.2025).

3. Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири / Э. Н. Валендик [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 3. С. 73–86.

4. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы / под общ. ред. Ю. Л. Воробьева ; МЧС России. М., 2004. 312 с.

5. Коровин Г. Н., Зукерт Н. В. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России / под ред. В. И. Данилова-Данильяна. М., 2003. С. 69–98.

6. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. М., 1949. 76 с.
7. Демаков Ю. М. Влияние факторов среды на рост деревьев в сосняках Республики Марий Эл : монография. Йошкар-Ола, 2023. 480 с.
8. Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск, 2000. 46 с.
9. Дроздова Т. И., Сороковикова Е. В. Анализ лесных пожаров в Иркутской области в 2010–2019 гг. // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. № 6 (1). С 29–41.
10. Тарасов Л. В. Ветры и грозы в атмосфере Земли. Долгопрудный, 2011. 286 с.
11. Холопцев А. В. Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 82–97.
12. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Л., 1969. 644 с.
13. The Physical Science Basis : Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker et al. Cambridge, 2013. 1535 pp. URL: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> (date of application: 25.01.2025).
14. Котляков В. М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-земная физика. 2012. № 21. С. 110–114.
15. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1984. 751 с.
16. РСБД Актинометрия : база данных // Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова : сайт. URL: <https://clck.ru/3P8cY3> (дата обращения: 12.02.2025).
17. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations / L. Hoffmann et al. // Atm. Chem. Phys. 2019. № 19. pp. 3097–3124.
18. ERA5 reanalysis of hourly data on pressure levels from 1979 to present : database. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels> (date of application: 25.01.2025).
19. Федоров В. М. Солярная теория изменений климата // Окружающая среда и энерговедение. 2021. № 2. С. 78–95.
20. Банк данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира : сайт. URL: <https://tutiempo.net/clima> (дата обращения: 25.01.2025).
21. Анисимов О. А., Жильцова Е. Л. Об оценках изменений климата XX и начала XXI веков по данным наблюдений на территории России // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107.
22. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб., 2022. 124 с.

REFERENCES

1. Shubkin R. G., Shirinkin P. V. Results of long-term forecasting of large-scale forest fires in the Baikal region // Siberian fire and rescue bulletin. 2016. № 3. pp. 35–38. URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v3/N3_9-12.pdf (date of application: 25.01.2025).

2. Information system of remote monitoring of the Federal Forestry Agency : official website. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (date of application: 25.01.2025).
3. Landscape fires of the taiga of Central Siberia / E. N. Valendik et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series. 2014. № 3. pp. 73–86.
4. Vorobyov Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Forest fires in Russia: Status and problems / Under the general editorship of Yu. L. Vorobyov ; EMERCOM of Russia. M., 2004. 312 p.
5. Korovin G. N., Zukert N. V. The impact of climate change on forest fires in Russia // Climate change: a view from Russia / Edited by V. I. Danilov-Danilyan. M., 2003. pp. 69–98.
6. Nesterov V. G. Forest flammability and methods of its determination. M., 1949. 76 p.
7. Demakov Yu. M. Influence of environmental factors on tree growth in pine forests of the Mari El Republic : monograph. Yoshkar-Ola, 2023. 480 p.
8. Sverlova L. I. Method of estimation of fire danger in forests by weather conditions taking into account atmospheric aridity belts and seasons of the year. Khabarovsk, 2000. 46 p.
9. Drozdova T. I., Sorokovikova E. V. Analysis of forest fires in the Irkutsk region in 2010–2019 // XXI century. Technosphere safety. 2021. № 6 (1). pp. 29–41.
10. Tarasov L. V. Winds and thunderstorms in the Earth's atmosphere. Dolgoprudny, 2011. 286 p.
11. Kholoptsev A. V. Changes in the frequency of dry thunderstorms during modern climate warming: the example of some areas of Yakutia and Krasnoyarsk Krai // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management. 2024. № 2 (62). pp. 82–97.
12. Khragian A. Kh. Physics of the atmosphere. Leningrad, 1969. 644 p.
13. The Physical Science Basis : Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker et al. Cambridge, 2013. 1535 pp. URL: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> (date of application: 25.01.2025).
14. Kotlyakov V. M. On the causes and consequences of modern climate changes // Solar-terrestrial physics. 2012. № 21. pp. 110–114.
15. Matveev L. T. Fundamentals of General Meteorology. Physics of the Atmosphere. Leningrad, 1984. 751 p.
16. RSDB Actinometry : database / The Voeikov Main Geophysical Observatory. URL: <https://clck.ru/3P8cY3> (date of application: 12.02.2025).
17. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations / L. Hoffmann et al. // Atm. Chem. Phys. 2019. № 19. pp. 3097–3124.
18. ERA5 reanalysis of hourly data on pressure levels from 1979 to present : database. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels> (date of application: 25.01.2025).
19. Fedoroff V. M. Solar theory of climate change // Environment and Energology. 2021. № 2. pp. 78–95.
20. A database of changes in weather conditions in various regions of the world : website. URL: <https://tutiempo.net/clima> (date of application: 25.01.2025).
21. Anisimov O. A., Zhiltsova E. L. On estimates of climate change in Russian regions in the XX century and early XXI century based on observational data // Meteorology and Hydrology. 2012. № 6. pp. 95–107.
22. The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. General Summary. St. Petersburg, 2022. 124 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович, д-р геогр. наук, профессор Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова, Севастопольское отделение (299053, Российская Федерация, г. Севастополь, Университетская ул., д. 33); профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); AuthorID: 467295; ORCID: 0000-0002-9757-5219; e-mail: kholoptsev@mail.ru

Шубкин Роман Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); AuthorID: 159572; Scopus Author ID: 57704690300; ORCID: 0000-0002-7163-8146; e-mail: r.shubkin@yandex.ru

Бабенышев Сергей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, математики и информационных технологий Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, г. Железнодорожск, ул. Северная, д. 1); AuthorID 14494; ORCID: 0000-0002-4298-2036; e-mail: sergei.babyonyshev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Kholoptsev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Sevastopol Branch of the State Oceanographic Institute named after N. N. Zubov, Sevastopol (33 Universitetskaya str. Sevastopol 299053, Russian Federation); Professor of the Chair of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (1 Severnaya str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RISC: 467295; ORCID: 0000-0002-9757-5219; e-mail: kholoptsev@mail.ru

Roman G. Shubkin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professo of the Chair of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire and Rescue Service of EMERCOM of Russia (1 Severnaya str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RISC: 159572; Scopus Author ID: 57704690300; ORCID: 0000-0002-7163-8146; e-mail: r.shubkin@yandex.ru

Sergey V. Babenyshev, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics, Mathematics and Informational Technologies, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (1 Severnaya str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation); ID RISC: 14494; ORCID: 0000-0002-4298-2036; e-mail: sergei.babyonyshev@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2025
Одобрена после рецензирования 11.06.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СУШЕ

Скрынников Алексей Юрьевич

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. В статье обоснована необходимость сокращения времени локализации разливов нефти и нефтепродуктов для минимизации экономического ущерба при авариях на опасных производственных объектах и территориях. Предложено решение проблемы путем разработки на основе результатов математического моделирования и последующего создания мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов на сухопутной территории и в прибрежной зоне водоемов. Учет основных недостатков и ограничений, характерных для существующих средств локализации нефти и нефтепродуктов и выявленных в ходе оценки качества, позволил получить наиболее точные данные для создания математической модели конструкции мобильного средства локализации. Разработка на основе результатов математического моделирования рациональной конструкции и параметров мобильного средства локализации позволит создать средство локализации с высокой степенью мобильности и сокращенным временем развертывания в различных вариантах применения. Его внедрение позволит сократить время проведения локализационных мероприятий и тем самым значительно снизить экологический и экономический ущерб для объектов экономики и территорий.

Ключевые слова: локализация разливов нефти и нефтепродуктов на суше, мобильное средство локализации, инженерно-технические сооружения, математическая модель, рациональные конструктивные параметры, конструкция

Для цитирования: Скрынников А. Ю. Математическое моделирование конструкции мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов на суше // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 151–162.

MATHEMATICAL MODELING OF THE DESIGN OF A MOBILE MEANS OF LOCALIZATION OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS SPILLS ON LAND

Alexey Yu. Skrynnikov

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

Abstract. This article substantiates the need to reduce the time of localization of oil and oil products spills in order to minimize economic damage in case of accidents at hazardous production facilities and territories. This problem can be solved by developing, based on the results of mathematical

modeling, and the subsequent creation of a mobile means for localizing oil and oil product spills on land and in the coastal zone of water bodies. The analysis and consideration of the main shortcomings and limitations characteristic of the existing containment facilities and identified during the assessment of the quality of oil and oil product spill containment facilities, taking into account their mobility, made it possible to obtain the most accurate data for the creation of a mathematical model of the mobile containment facility design. Based on the results of mathematical modeling, the development of a rational design and parameters of a mobile localization tool will make it possible to create a localization tool with a high degree of mobility and reduce deployment time in various applications. Its implementation will reduce the time for localization activities and, thereby, significantly reduce environmental and economic damage to economic facilities and territories. The relevance of the article is based on the need to eliminate the environmental consequences of the ongoing accidents with oil and oil product spills.

Keywords: localization of oil and oil products spills on land, mobile containment facility, engineering and technical structures, mathematical model, rational design parameters, design

For Citation: Skrynnikov A. Yu. Mathematical Modeling of the Design of a Mobile Means of Localization of Oil and Petroleum Products Spills on Land // *Technospheric safety*. 2025. № 3 (48). pp. 151–162.

Введение

Анализ причин возникновения крупных аварий и катастроф в России в нефтяном комплексе свидетельствует, что не только при авариях на объектах нефтепользования, но и при их нормальной эксплуатации нередко имеют место масштабные разливы нефти и нефтепродуктов (далее — ННП), которые приводят к большим экономическим потерям, ухудшению экологической обстановки, а в некоторых случаях и к экологическим катастрофам [1].

Так, например, добыча нефти (с учетом газоконденсата) в 2023 г. в России составила 530,6 млн т, по сравнению с показателем 2022 г. — 380,2 млн т [2], что привело к увеличению нагрузки на нефтепроводы и предприятия по ее переработке, а также увеличению риска возникновения аварий и материального ущерба от них.

Материалы и методы

Размер ущерба от разливов ННП на суше напрямую зависит от оперативности их локализации и может быть уменьшен за счет совершенствования мероприятий по их ликвидации. Именно локализация разлива ННП [3], являясь первичным этапом его ликвидации, обеспечивает ограничение распространения зеркала разлива и, в свою очередь, уменьшает ущерб от аварии.

В настоящее время основными техническими средствами для локализации разливов ННП являются различные виды заграждений, такие как ограждения для предотвращения растекания ННП (земляные насыпи, перехватывающие траншеи, барьеры из подручных материалов, подпорные стенки), сорбирующие ограждения (боны, обвалования из сорбирующих материалов),

ограждения для предотвращения попадания ННП в грунтовые воды (дамбы) [4].

Большинство из них возводят при помощи шанцевого инструмента и тяжелой дорожно-строительной техники, что значительно увеличивает время локализации разлива ННП за счет трудозатрат и необходимости доставки техники к местам проведения работ.

Таким образом, возрастание ущерба от аварий и ЧС с разливом ННП может быть связано с недостаточной эффективностью локализации разливов и применяемых технических средств.

В связи с этим представляется целесообразным разработка новых технических средств локализации разливов ННП как части комплекса мероприятий, направленных на прекращение распространения разлитых или выливаемых ННП на поверхности грунта или водного объекта, проводимых путем установки заграждений, проведения земляных работ или использования специальных средств [5].

В работах ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России [6] представлены теоретические положения к обоснованию новых технических средств и способов локализации и ликвидации разливов ННП, основанные на риск-ориентированных подходах.

Результаты применения существующих средств локализации разливов ННП участниками ликвидации ЧС на практике позволили сформулировать основные требования к перспективному средству локализации разливов ННП с высокой мобильностью:

- возможность транспортировки основными видами транспорта;
- возможность развертывания и применения силами персонала, не имеющего высокой квалификации;

- возможность развертывания без применения дополнительных крепежных элементов;
- способность к локализации разливов ННП на различных подстилающих поверхностях (в т. ч. на прибрежных территориях в притопленном варианте для фильтрации нефтяных выносов);
- устойчивость к опрокидыванию и сдвигу под воздействием давления жидкостей, которые разливаются при аварии;
- возможность увеличения длины локализующего рубежа и изменения его конфигурации;
- возможность совместной работы с техническими средствами для ликвидации разливов ННП, навесным диагностическим оборудованием.
- устойчивость к воздействию коррозионно-агрессивных сред, возможность применения механической и химической очистки после использования.

Применение мобильных средств локализации разливов ННП с малым временем развертывания особенно актуально при авариях с разливом ННП на опасных производственных объектах (далее — ОПО) ввиду значительного экономического ущерба. Также успешному применению мобильных средств локализации разливов ННП на территории ОПО возможность его применения силами нештатных спасателей и персонала объекта [5].

Основной целью моделирования мобильных средств локализации разливов ННП и обоснования их конструктивных характеристик является снижение ущерба природной среде и инфраструктуре за счет сокращения площади разлива ННП, что напрямую зависит от времени развертывания.

Таким образом, техническое решение для мобильного средства локализации разливов ННП должно обеспечивать снижение ущерба за счет сокращения площади раз-

лива ННП и удовлетворять требованиям и ограничениям, т. е. $S_{\text{разл}} \rightarrow \min$, достигается сокращением времени разворачивания МЗС:

$$S_{\text{разл}} = \frac{W_{\text{Н (ННП)}}}{h_{\text{Н (ННП)}}} = \frac{V_{\text{Н (ННП)}}}{h_{\text{Н (ННП)}}} t, \quad (1)$$

где:

$W_{\text{Н (ННП)}}$ — объем разлива ННП, м³/с;

$h_{\text{Н (ННП)}}$ — высота слоя ННП, м;

$V_{\text{Н (ННП)}}$ — скорость поступления ННП, м/с;

t — время поступления ННП, с.

Вариантов реализации мобильных средств локализации разливов ННП может быть предложено достаточно много, но эта работа посвящена реализации одного из них, представленного на рис. 1в, с проведением структурной и параметрической оптимизации его конструкции.

В ходе математического моделирования и проведения структурной и параметрической оптимизации конструкции мобильного средства локализации разливов ННП проведены расчеты возможных вариантов конструкции, соответствующих конструктивным требованиям к мобильным средствам локализации разливов ННП. Их боковые проекции схематично представлены на рис. 1.

Требования к мобильности конструкции мобильного средства локализации разливов ННП приведены в табл. 1.

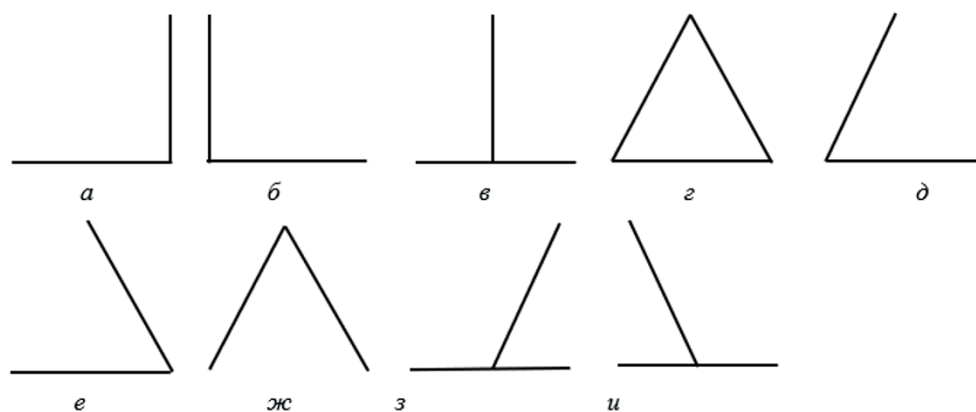


Рис. 1. Возможные варианты конструкции мобильного средства локализации разливов ННП

Fig. 1. Possible design options for a mobile OPP spill containment facility

В табл. 2 приведены технические и физические параметры возможных вариантов конструкции мобильного средства локали-

зации разливов ННП, оцененные по трехбалльной системе: 1 — отлично, 2 — хорошо, 3 — удовлетворительно.

Таблица 1
Ограничения по габаритам предполагаемых средств транспортировки мобильного средства локализации разливов ННП

Table 1
 Restrictions on the dimensions of the intended means of transportation of the mobile OPP spill containment facility

№ п/п	Параметр Parameter	Значение ограничения Meaning restrictions	Основание Foundation
1	Длина секции (L), м Section length (L), m	≤ 2	Возможность оперативной доставки к месту применения на существующих видах транспорта (автоприцепы с наклонным кузовом) Possibility of prompt delivery to the place of application on existing modes of transport (trailers with inclined body)
2	Ширина секции (B), м Section width (B), m	$\leq 1,2$	
3	Высота секции (H), м Section height (H), m	$\leq 1,5$	
4	Масса секции (m), кг Section weight (m), kg	≤ 60	ГОСТ 12.2.033–78 ССБТ, допустимая масса, перемещаемая одним человеком, — 30 кг [7] GOST 12.2.033–78 SSBT, permissible weight moved by one person is 30 kg)

Таблица 2
Сравнительные технические и физические параметры различных конструкций мобильного средства локализации разливов ННП

Table 2
 Comparative technical and physical parameters of various designs of the mobile means of containment of oil spills

№ п/п	Параметр Parameter	1а	1б	1в	1г	1д	1е	1ж	1з	1и
1.	Вес Weight	1	1	1	3	2	2	2	2	2
2.	Габариты Dimensions	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.	Габариты в сложенном состоянии Dimensions when folded	1	1	2	2	2	2	2	3	3
4.	Устойчивость к сдвигу и опрокидыванию Shear and tip stability	1	1	1	1	1	1	1	2	2
5.	Прилегание к поверхности Fit to the surface	1	1	1	1	1	1	3	1	1
6.	Способность к увеличению длины локализующего рубежа и изменения его конфигурации Shear and tip stability	1	1	2	3	3	3	3	3	3
7.	Возможность разворачивания без применения дополнительных крепежных элементов Can be deployed without the need for additional fasteners	1	1	3	3	3	3	3	3	3
8.	Сумма баллов показателей Sum of indicator points	7	7	11	14	13	13	15	15	15

Поясним поставленные баллы.

Вес. Пропорционален периметру сторон при одинаковой длине конструкции, равной 2 м. Наименьшим периметром и поэтому минимальным весом обладают варианты 1а–в (1 балл), наибольшим — 1з (3 балла).

Габариты. Конструкции проектировали так, чтобы их габариты были 1 × 1 м, следовательно, все они имеют по одному баллу.

Габариты в сложенном состоянии. Важный параметр для транспортировки. Наименьшим размером в сложенном состоянии (1 м) обладают конструкции 1а–б (1 балл), а наибольшим — 1з–и (3 балла).

Устойчивость к опрокидыванию и сдвигу. Наибольшим моментом опрокидывания обладают варианты 1а–ж (1 балл), а наименьшим — 1з–и (2 балла).

Прилегание к поверхности. Наилучшим прилеганием обладают схемы 1а–е, з–и (1 балл), а наихудшим — 1ж (3 балла).

Способность к увеличению длины локализирующего рубежа и изменению его конфигурации. Наилучшей способностью

к наращиванию обладают варианты 1а–б (1 балл), а наихудшими — 1з–и (3 балла).

Возможность разворачивания без применения дополнительных крепежных элементов. Наилучшей разворачиваемостью обладают варианты 1а–б (1 балл), а наихудшей — 1в–и (3 балла).

Из данных табл. 2 следует, что лучшими характеристиками обладают конструкции под номерами 1а, б и в (рис. 2). Поэтому, исходя из требований к мобильности и устойчивости конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, ряд вариантов конструкции на рис. 1 можно удалить из рассмотрения как не соответствующие приведенным требованиям (рис. 1з–и).

Приемлемыми значениями массы, мобильности, устойчивости и др. обладают только варианты конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, представленные на рис. 2.

В качестве примера приведен расчет одного из вариантов конструкции мобильного средства локализации разливов ННП (вариант на рис. 1в), представленного на рис. 3.

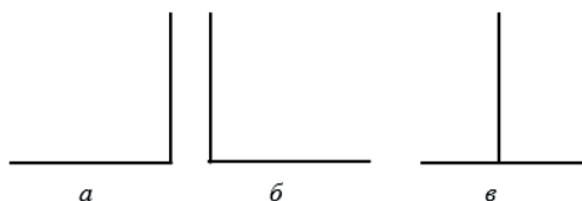


Рис. 2. Варианты конструкции мобильного средства локализации разливов ННП с приемлемыми параметрами

Fig. 2. Design options for a mobile OPP spill containment facility with acceptable parameters

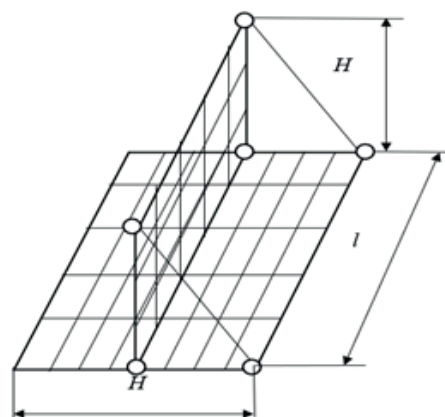


Рис. 3. Вариант в конструкции мобильного средства локализации разливов ННП

Fig. 3. Variant in the design of a mobile means of containment of OPP spills

Шарниры конструкции позволяют складывать ее для транспортировки и наращивания длины заграждения.

Вес конструкции мобильного средства локализации разливов ННП (G) на рис. 3 равен:

$$G = 4G_H + 4G_l + 2G_{\text{сетчатой плоскости}} + 2G_{\text{откоса}} = \rho g \frac{\pi d^2}{4} (4H + 4l + 2 \cdot 1,12H) + 2\rho_c g H l. \quad (2)$$

При $\rho_m = 8000 \text{ кг/м}^3$ — удельный вес металла; $d = 0,01 \text{ м}$ — диаметр каркаса; $H = 1 \text{ м}$ — длина боковины; $l = 2 \text{ м}$ — длина продольных частей каркаса; размере сетки $0,1 \times 0,1 \text{ м}$, диаметре прутьев сетки $0,004 \text{ м}$ и удельном весе сетки $\rho_c = 1,75 \text{ кг/м}^2$ получим $G = 15,9 \text{ кг}$.

Пусть уровень ННП, удерживаемых конструкцией, равен h . Тогда на поверхность опоры действует вес конструкции G и жидкости $G_{\text{ж}}$, как показано на рис. 4. От веса ННП, удерживаемых конструкцией мобильного средства локализации разливов ННП, действует сдвигающая сила F .

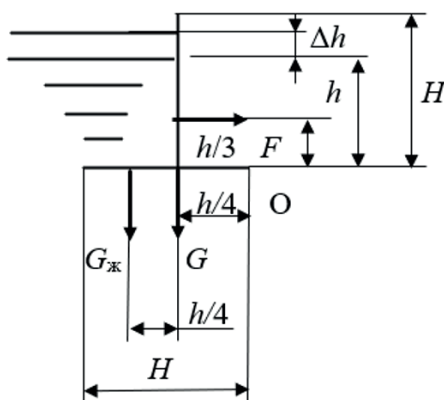


Рис. 4. Силы, действующие на конструкцию мобильного средства локализации разливов ННП

Fig. 4. Forces acting on the structure of a mobile OPP spill containment facility

Рассмотрим возможность сдвига конструкции мобильного средства локализации

разливов ННП под действием давления массы ННП на вертикальную поверхность.

Критерием сдвига является условие:

$$F > k(G + G_{\text{ж}}), \text{ или } \frac{1}{2}\rho_{\text{ж}}gh^2l > k[\rho g \frac{\pi d^2}{4}(6,24H + l) + 2\rho_c g H l + \rho_{\text{ж}}gh \frac{H}{2}l], \quad (3)$$

где k — коэффициент трения конструкции.

Преобразуя неравенство (3), оставив первое слагаемое веса конструкции G , пе-

ренесе $G_{\text{ж}}$ в другую часть неравенства и сократив ρ при условии $\rho = 8\rho_{\text{ж}}$, получим следующее неравенство:

$$hHl(1 - 2k) > 3kd^2(H + l). \quad (4)$$

Из анализа неравенства (4) следует, что левая часть близка нулю или отрицательна, поэтому сдвиг конструкции под действием удерживаемых ННП практически невозможен.

Рассмотрим возможность опрокидывания конструкции мобильного средства локализации разливов ННП под действием сил бокового давления, как показано на рис. 4, вокруг точки О.

Критерием опрокидывания является условие:

$$M_0 > \frac{h}{4} G_{ж}, \text{ или } \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \rho_{ж} g h^2 l > \frac{h}{4} \rho_{ж} g h H l, \quad (5)$$

где M_0 — момент опрокидывания.

Из анализа неравенства (5) следует, что и опрокидывание конструкции вокруг точки О под действием удерживаемых ННП практически невозможно, поскольку левая часть неравенства $h/6$ всегда меньше правой $h/4H$.

Рассмотрим возможный сдвиг конструкции мобильного средства локализации разливов ННП на рис. 4 при наличии осадков, увеличивающих уровень жидкости на Δh , тогда условие сдвига (4) при равенстве $\rho_{ж} = \rho_{ННП} = \rho_{осадки}$ примет вид:

$$F > k(G + G_{ж}), \quad \text{или} \quad \frac{1}{4} \rho_{ж} g (h + \Delta h) H l > k [\rho_{ж} \pi d^2 (H + l) + 2 \rho_{с} g H l + 2,22 H + \rho_{ж} g (h + \Delta h) \frac{H}{2} l]. \quad (6)$$

Из анализа неравенства (6) следует, что по аналогии с неравенством (4) сдвиг конструкции под действием удерживаемых ННП практически невозможен.

Рассмотрим возможность опрокидывания конструкции под действием сил бокового давления (рис. 4) при наличии осадков, увеличивающих уровень жидкости на Δh , вокруг точки О.

Критерием опрокидывания является условие:

$$M_0 > \frac{H}{2} G + \frac{3}{4} G_{ж}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \rho_{ж} g (h + \Delta h) H l > \frac{H}{2} [\rho_{ж} \pi d^2 (H + l) + 2 \rho_{с} g H l + 2,22 H] + \frac{3}{4} \rho_{ж} g (h + \Delta h) \frac{H}{2} H l. \quad (7)$$

Из анализа неравенства (7) следует, что опрокидывание конструкции вокруг точки О под действием удерживаемых ННП со слоем осадков практически невозможно.

Рассмотрим возможность сдвига конструкции мобильного средства локализа-

ции разливов ННП при попутном ветре, учитывая парусность конструкции.

Одновременное воздействие на конструкцию удерживаемого слоя ННП ($F_{ННП}$), осадков ($F_{ос}$) и попутного ветра ($F_{ос}$) равно F_{Σ} :

$$F_{\Sigma} = F_{ННП} + F_{ос} + F_{ос} = \rho_{ж} g h \frac{H}{2} l + \rho_{ж} g \Delta h H l + p g (H - h - \Delta h) l. \quad (8)$$

Оценим величину силы при:

$$H = 1 \text{ м}, l = 2 \text{ м}, \rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3, p = 138 \text{ Па}, h = 0,3 \text{ м}, \Delta h = 0,05 \text{ м}.$$

Получим:

$$F_{\Sigma} = \rho_{ж} g h \frac{H}{2} l + \rho_{ж} g \Delta h H l + p g (H - h - \Delta h) l = 240 + 100 + 276 \cdot 10^{-5} \approx 400 \text{ кг}.$$

Данные расчетов по обоснованию параметров различных вариантов конструкции

мобильного средства локализации разливов ННП приведены в табл. 3.

Таблица 3
Параметры расчетов вариантов конструкции мобильного средства
локализации разливов ННП

Table 3
 Calculation parameters of the design options of the mobile OPP
 spill containment facility

№ п/п	Параметр Parameter	Вариант а Option a	Вариант б Option b	Вариант в Option c
1.	Масса конструкции (секции) (m), кг Weight of the structure (sections) (m), kg	18,3	18,3	15,9
2.	Длина конструкции (секции) (L), м Length of the structure (section) (L), m	2	2	2
3.	Ширина по основанию конструкции (секции) (B), м Width at the base of the structure (section) (B), m	1	1	2
4.	Высота конструкции (секции) (H), м Height of the structure (sections) (H), m	1	1	1
5.	Момент опрокидывания конструкции (M), (условия выполнения) Structure Tipping Moment (M), (Execution Conditions)	+	+	+
6.	Сила сдвига конструкции (F), (условия выполнения) Structural Shear Force (F), (Execution Conditions)	+	+	+

Для конструкции мобильного средства локализации разливов ННП по варианту 1в, согласно табл. 3, выигрыш в массе единичной секции по отношению к вариантам конструкций на рис. 1а и 1б, составляет 2,4 кг. При загрузке конструкции мобильного средства локализации разливов ННП на стандартный транспортный прицеп с наклоняемым кузовом длиной 5 м, в него входит 50 секций, сложенных гармошкой, получим суммарный выигрыш в массе в 120 кг. Этот факт существенно облегчает развертывание конструкции мобильного средства локализации разливов ННП с учетом требований [7].

Результаты и их обсуждение

Таким образом, исходя из требований к мобильности и устойчивости, из всех приведенных вариантов конструкции мобильного средства локализации разливов ННП вариант в (рис. 3) является наиболее рациональным, может считаться отвечающим

предъявляемым требованиям и пригодными для моделирования.

При сравнении результатов математического моделирования расчетные значения параметров конструкции мобильного средства локализации разливов ННП соответствуют ограничениям по имеющимся габаритам предполагаемых средств транспортировки (доставки к месту развертывания) с учетом ограничений при практическом применении [7, 8].

Сравнительные данные по расчетным параметрам конструкции мобильного средства локализации разливов ННП и ограничениям приведены в табл. 4. Исходя из них можно сделать вывод о соответствии расчетных показателей конструкции мобильного средства локализации разливов ННП ограничениям по массогабаритным характеристикам. Результаты математического моделирования обосновывают рациональные параметры и мобильность конструкции мобильного средства локализации разливов ННП, а также соответствие ограничениям.

Таблица 4
Сравнительные данные по расчетным параметрам конструкции
мобильного средства локализации разливов ННП и ограничениям
по габаритам предполагаемых средств транспортировки

Table 4
 Comparative Data on the Design Parameters of the Mobile Spill
 Containment Facility and Restrictions on the Dimensions of the Proposed Means
 of Transportation

№ п/п	Параметр Parameter	Расчетное значение Estimated meaning	Значение ограничения Meaning restrictions	Основание Foundation
1	Длина секции (L), м Section length (L), m	2	≤ 2	Возможность оперативной доставки к месту применения на существующих видах транспорта (автоприцепы с наклонным кузовом) Possibility of prompt delivery to the place of application on existing modes of transport (trailers with inclined body)
2	Ширина секции (B), м Section width (B), m	1	$\leq 1,2$	
3	Высота секции (H), м Section height (H), m	1	$\leq 1,5$	
4	Масса секции (m), кг Section weight (m), kg	15,6	≤ 60	ГОСТ 12.2.033–78 ССБТ, допустимая масса, перемещаемая одним человеком, — 30 кг [7] GOST 12.2.033–78 SSBT, permissible weight moved by one person is 30 kg)

Выводы

1. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью снижения как экономических, так и временных затрат на проведение локализации разливов ННП при авариях на ОПО и других объектах экономики, а также на территориях.
2. Предложена идея сокращения времени локализации разливов ННП за счет применения средств локализации разливов ННП с высокой степенью мобильности, что позволит сократить экономический и экологический ущерб.
3. Приведены данные математического моделирования конструкции мобиль-

ного средства локализации разливов ННП на суше, в рамках которого решены следующие задачи:

- оценка качества средств локализации разливов ННП с учетом их мобильности;
 - создание математической модели конструкции мобильного средства локализации разливов ННП;
 - проработка рациональной конструкции и параметров мобильного средства локализации разливов ННП.
4. Разработка и внедрение мобильного средства локализации разливов ННП на суше позволит снизить экологический и экономический ущерб для объектов экономики и территорий РФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Владимиров В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы исследования. 2014. № 1. С. 217–229.
2. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору : сайт. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 09.07.2025).
3. Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории РФ, за исключением внутренних морских вод и территориального моря РФ, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства РФ : постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://clck.ru/3PEGnv> (дата обращения: 12.07.2025).
4. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М., 2005. 368 с.
5. Гарелина С. А., Латышенко К. П., Скрынников А. Ю. К вопросу разработки мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов // Проблемы противодействия техногенным, биогенным, социокультурным угрозам и пути их решения : сб. мат. научно-практической конференции / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). М., 2023. С. 13–19.
6. Рекомендации по применению технических средств при ликвидации последствий разлива нефтепродуктов / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). М., 2020. 33 с.
7. ГОСТ 12.2.033–78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования : госуд. стандарт СССР : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министерства России от 26.04.1978. М., 1978. 9 с.
8. ТУ 8026-010-35615057–03. Подпорные стенки нефтеограждающие // ЛЕССОРБ : сайт. URL: lessorb.ru/products/bony/podpornye_stenki (дата обращения: 04.07.2025).

REFERENCES

1. Vladimirov V. A. Oil Spills: Causes, Scales, Consequences // Strategy of Civil Protection: Research Problems. 2014. № 1. pp. 217–229.
2. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2022 // Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision : website. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (date of application: 09.07.2025).
3. On Approval of the Rules for the Organization of Measures for the Prevention and Elimination of Oil and Oil Products Spills on the Territory of the Russian Federation, Except for Internal Sea Waters and the Territorial Sea of the Russian Federation, as well as on the Invalidation of Certain Acts of the Government of the Russian Federation : decree of the Government of the Russian Federation dated 31.12.2020 № 2451 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://clck.ru/3PEGnv> (date of application: 12.07.2025).

4. Vorobyov Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Prevention and liquidation of emergency oil and oil products. M., 2005. 368 p.
5. Garelina S. A., Latyshenko K. P., Skrynnikov A. Yu. Problems of countering technogenic, biogenic, socio-cultural threats and ways to solve them : proceedings of the International Scientific and Practical Conference / VNII GOChS (FC). M., 2023. pp. 13–19.
6. Recommendations for the use of technical means in the liquidation of the consequences of an oil spill / VNII GOChS (FC). M., 2020. 33 p.
7. GOST 12.2.033–78. SSBT. Workplace when performing work standing. General ergonomic requirements : state. USSR standard: approved and put into effect by the resolution of the State Committee for Standards of the Council of the Ministry of Russia 26.04.1978. M., 1978. 9 p.
8. TU 8026-010-35615057–03 Oil retaining walls // LESSORB : website. URL: lessorb.ru/products/bony/ podpornye stenki (date of application: 04.07.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Скрынников Алексей Юрьевич, старший преподаватель учебно-методического отдела Института развития МЧС России Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexey Yu. Skrynnikov, Senior Lecturer of the Educational and Methodological Department of the Institute of Development of Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (Sokolovskaya, 1A, Khimki, 141435 Russian Federation); SPIN-код: 7465-2434; AuthorID: 865332; e-mail: skrynnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2025
Одобрена после рецензирования 11.08.2025
Принята к публикации 15.09.2025

УДК 614.8.084

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Волынец Игорь Григорьевич, Терехов Алексей Леонидович, Чубуков Николай Николаевич
Газпром ВНИИГАЗ, п. Развилка, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация. В статье обсуждаются сложности обеспечения техносферной безопасности на объектах газотранспортной системы, обусловленные большой протяженностью магистральных трубопроводов и разветвленностью сетей газораспределения. Очерчена нормативно-правовая ниша исследований, определены основные понятия предметной области. Рассмотрены категории техносферных рисков по причинности их возникновения. Обоснована актуальность выявления ранних признаков наступления ситуаций повышенного риска, составлен минимально достаточный перечень параметров, которые характеризуют надвигающуюся ЧС и степень ее опасности. Сформулированы системные требования к ранним признакам ЧС. Показана целесообразность перехода к стационарным встроенным в трубопроводы системам автоматической регистрации ранних признаков вероятных катастроф, техническим решением которого могут быть системы визуализации звука, совмещающие высокую чувствительность и избирательную способность к определенным звукам с хорошо разработанной методологией распознавания цветографических образов. В операторной форме приведены математические модели, связывающие акустическую сеть микрофонов с техническим состоянием трубопроводов, условиями их эксплуатации и техносферными рисками. Математическая модель статуса техносферной опасности объекта в зоне ответственности системы акустического контроля приведена к экстремальному виду, допускающему разрешение задачи методами математической статистики. Разработаны логические операторы для построения разветвленных и циклических цепочек принятия решений. Обоснованы преимущества применения топологии акустической системы на принципах сетевого интеллекта. Показана в общем виде структура обновляемой базы реперных признаков, позволяющая извлекать актуальные данные для сравнения с текущими результатами и реализовать логику определения техносферных рисков в режиме реального времени.

Ключевые слова: аварийность, акустический мониторинг, безопасность, газотранспортная сеть, профилактические меры, прогнозирование, программный робот, ранние признаки, сетевой интеллект, техносфера, угроза, уровень риска, чрезвычайная ситуация, шумограмма

Для цитирования: Волынец И. Г., Терехов А. Л., Чубуков Н. Н. Техносферная безопасность объектов газотранспортной сети на основе технологий акустической визуализации // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 163–174.

TECHNOSPHERIC SAFETY OF GAS TRANSMISSION NETWORK FACILITIES BASED ON ACOUSTIC IMAGING TECHNOLOGY

Igor G. Volynets, Alexey L. Terekhov, Nikolay N. Chubukov

Gazprom VNIIGAZ, Razvilka settlement, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. The article discusses the difficulties of ensuring technospheric safety at gas transmission system facilities due to the large length of main pipelines and the extensive distribution networks. The regulatory niche of research is outlined, the basic concepts of the subject area are defined. The categories of technospheric risks according to the causality of their occurrence are considered. The relevance of identifying early signs of high-risk situations is substantiated, and a minimally sufficient list of parameters that characterize an impending emergency and the degree of its danger is compiled. The system requirements for the early signs of an emergency are formulated. The expediency of switching to stationary systems built into pipelines for automatic registration of early signs of probable disasters is shown. The technical solution of this proposal may be sound visualization systems that combine high sensitivity and selectivity for certain sounds with a well-developed methodology for recognizing color images. Mathematical models in operator form are presented that connect the acoustic network of microphones with the technical condition of pipelines, their operating conditions and technospheric risks. The mathematical model of the technospheric hazard status of an object in the area of responsibility of the acoustic control system has been reduced to an extreme form, allowing the problem to be solved using mathematical statistics methods. Logical operators have been developed for building branched and cyclic decision-making chains. The advantages of using the topology of a speaker system based on the principles of network intelligence are substantiated. The structure of the updated database of reference knowledge is shown in general, which allows extracting up-to-date data for comparison with current results and implementing the logic of determining technospheric risks in real time.

Keywords: localization of oil and oil products spills on land, mobile containment facility, engineering and technical structures, mathematical model, rational design parameters, design

For Citation: Volynets I. G., Terekhov A. L., Chubukov N. N. Technosphere safety of gas transmission network facilities based on acoustic imaging technology // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 163–174.

Введение

Непрерывный процесс поддержания достаточного уровня техносферной безопасности газотранспортной сети (ГТС) России затруднен в связи с тем, что это рассредоточенная сеть газопроводов очень большой

протяженности, которая покрывает территорию всей страны. С учетом природных (климатических, сейсмических, географических) и технических (диаметр, толщина трубы и др.) условий выбираются различные способы прокладки трубопроводов: надземный, подземный и подводный. Сложность

построения единой системы предупреждения чрезвычайных ситуаций обусловлена тем, что каждый способ прокладки имеет специфические риски возникновения аварий с учетом всех факторов и требует индивидуального подхода при математической формализации и оценке состояния безопасности ГТС.

Техносферная безопасность предполагает три аспекта рассмотрения рисков: производственно-эксплуатационный, экологический и социальный. Риски производственно-эксплуатационного характера обусловлены уровнем промышленного исполнения и соблюдением стандартов технологии прокладки, а также полнотой и своевременностью проведения периодических проверок эксплуатационного состояния трубопроводов и регламентных работ. Экологические риски особенно актуальны для сети газопроводов, поскольку авария с утечкой газа нередко влечет за собой воспламенение, взрыв, площадные пожары с нанесением вреда окружающей среде и снижением биологического разнообразия видов растений и животных. Социальные риски определяются безопасностью населения и обслуживающего ГТС технического персонала, а также экономическим ущербом.

Нормативное регулирование

Нормативно-правовым основанием для обеспечения безопасности труда на газораспределительных объектах Газпрома служит стандарт [1]. Он устанавливает требования к построению Единой системы управления охраной труда и промышленной безопасностью при осуществлении транспортировки газа по трубопроводам, эксплуатации газораспределительных систем и других видах

деятельности. В силу большой разветвленности газораспределительной сети зачастую признаки техносферной опасности сложно обнаружить заблаговременно, и реагировать приходится по факту чрезвычайных ситуаций (ЧС) с существенно повышенными рисками несчастных случаев (НС).

Причины возникновения ЧС сходятся к трем основным категориям [2]:

- техногенные (56 %);
- человеческий фактор (40 %);
- природные катастрофы (4 %).

Все большую актуальность приобретает защита ГТС от преднамеренных спланированных террористических актов, в т. ч. с применением беспилотных летательных аппаратов.

Стандарт [1, п. 3.1.16] предписывает проведение мониторинга, под которым понимается контроль и анализ состояния объектов, соответствие деятельности организации требованиям охраны труда и промышленной безопасности, политике, целям, программам в области охраны труда и промышленной безопасности. Этот нормативный документ определяет понятия:

- происшествие — любое нежелательное событие, которое привело или могло привести к ущербу здоровью работника на производстве, аварии или инциденту (п. 3.1.31);
- профессиональный риск — вероятность повреждения (утраты) здоровья или смерти при исполнении сотрудником обязанностей по трудовому договору и в иных установленных настоящим законом случаях (п. 3.1.32);
- управление рисками — совокупность мероприятий, направленных на снижение вероятности нанесения и/или на уменьшение ущерба от реализации риска (п. 3.1.38);

- потенциальное несоответствие — ситуация, когда не обнаружено объективных свидетельств невыполнения требований, но отсутствие должного внимания к выявленному факту может привести к возникновению критичного несоответствия в будущем (п. 3.1.26).

Угроза причинения техносферного вреда носит вероятностный характер, который можно оценить на основе статистической обработки данных о произошедших ранее несчастных случаях, регистрации нарушений установленных нормативных значений опасных факторов, анализа причинно-следственных цепочек взаимообусловленных состояний ГТС, которые могут привести к недопустимому уровню техносферных угроз.

Выявление потенциальных несоответствий, в связи с п. 3.1.26, можно назвать ранними признаками или предпосылками ЧС. Накопление статистики и причинно-следственный анализ ранних признаков представляет особую ценность для поисковых НИОКР, поскольку только их надежное извлечение из потоков данных позволяет заблаговременно рассчитать критическую вероятность возможного наступления ЧС, а также принять своевременные меры по их недопущению или минимизации вреда. Эта задача может быть решена с применением современных IT-технологий [3].

Теория и методы

Мониторинг статуса техносферной опасности ГТС предполагает текущее наблюдение за физическими проявлениями всех критичных факторов и оценку рисков ЧС с использованием приемников информации. В настоящее время научно-исследовательские работы ВНИИГАЗ направлены на разработку

и формирование баз данных акустических сигналов объектов контроля и среды, шумовую защиту рабочих мест и селитебных зон, а также на создание уникальных алгоритмов обработки больших цифровых массивов звуковых данных для выделения ранних идентификационных признаков наступления ЧС техногенного и природного характера [4, 5]. Набор регистрируемых ранних признаков аварий может обладать следующими свойствами:

- быть уникальным для конкретного объекта мониторинга;
- иметь различную степень достоверности и информативности о возможной аварии;
- коррелироваться с другими признаками или условиями (помехами);
- быть помехоустойчивым, воспроизводимым.

Эффективность акустической системы может зависеть от:

- расположения и плотности насыщения производственной среды датчиками;
- диапазонов и чувствительности приема звуковых сигналов;
- статистической устойчивости алгоритма распознавания признака;
- уровня и характера шумов.

Информационный потенциал акустической среды до сих пор не был достаточно востребован в мировой практике для обеспечения безопасности ЧС в силу высокой сложности процедур: извлечения актуальных фрагментов шумовых спектров, редукции размерности акустических измерений, отображения сигнатур звуковых детекторов в метрические пространства для количественных оценок рисков ЧС. Между тем, промышленные микрофоны и средства

распознавания шумов за последние два десятилетия стремительно шагнули вперед, что определяет перспективность этого сектора поисковых исследований для прогнозирования катастроф и выработки сценариев их предотвращения.

Примерами успешного применения детекторов звука могут служить интеллектуальные системы анализа речи, сигнализаторы сейсмической активности почвы, системы вибродиагностики отказов установок,

гидроакустические автоматические системы обнаружения целей на флоте. Звуковая физическая среда окружает практически все физические объекты и одновременно является проводником колебаний в широком акустическом диапазоне — от 0,001 Гц (инфразвук) до 100 МГц (гиперзвук).

Визуализация акустических шумов позволяет решать широкий класс прикладных задач с использованием алгоритмов распознавания образов (рис. 1).

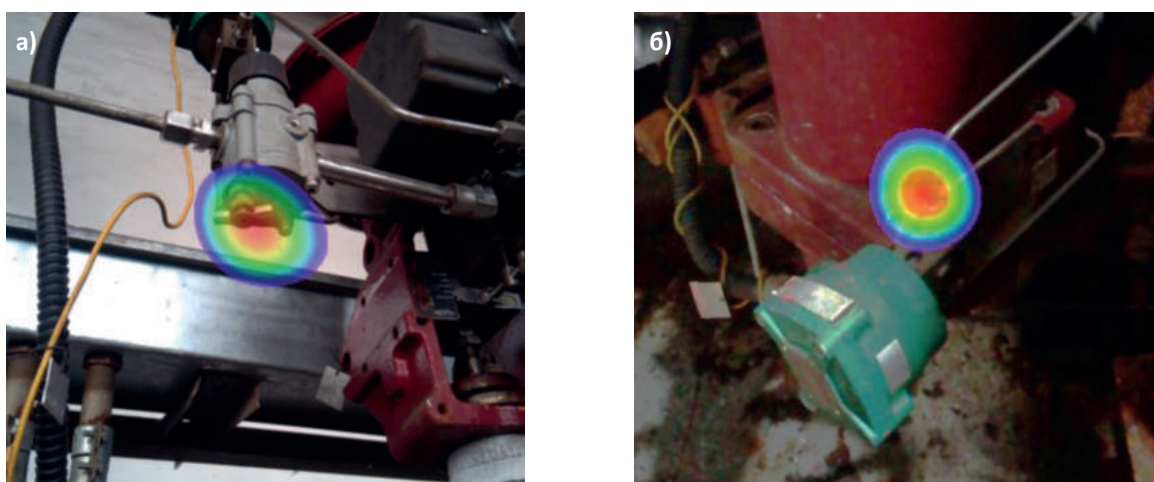


Рис. Визуализированные образы нарушения герметичности оборудования и утечках газа в регулирующих клапанах КИПиА фильтровального отделения а) через резьбу; б) через тройник

Fig. Visualized images of equipment leakages and gas leaks in the control valves of the instrumentation and control system of the filter compartment: a) through the thread; b) through the tee

Очевидно, звуковой сканер выделяет акустическую неоднородность из шума и точно указывает на ее местонахождение. По параметрам изображения на мониторе можно судить о характере неисправности, тенденциях ее развития и определять наилучший способ реагирования.

Перспективы внедрения

Наработанный методический задел в сфере цифровизации и визуализации звука, распознавания аномальных фрагментов шумограмм на основе объемных микрофонных платформ различной конфигурации с приме-

нением нейросетевых алгоритмов позволяет прогнозировать в ближнесрочной перспективе (5–7 лет) высокую востребованность основанных на этой технологии высокоавтоматизированных систем для предупреждения ситуаций повышенного риска различных (СПР) технических объектов.

Проводимые ВНИИГАЗ НИОКР нацелены на разработку стационарной распределенной интеллектуальной сети, состоящей из типовых ячеек — высокоавтоматизированных локальных акустических наблюдателей статуса опасности участка ГТС в своей зоне ответственности. Информационные роботы смежных участков имеют возможность

взаимодействия посредством протоколов обмена данными. Такая сенсорная сеть способна: уточнять данные о воспринимаемых разными ячейками одних и тех же событиях, взаимно верифицировать получаемые от объектов контроля акустические данные, дополнять разрозненную информацию до целостной картины, совместно конструировать прогнозные сценарии, оптимизировать действия по предотвращению ЧС или минимизации их последствий, согласовывать решения по передаче данных на пульт оператора.

Предлагаемая концепция акустического мониторинга состояния техносферной безопасности ГТС может быть выполнена на информационной платформе умной сети и позволяет обнаруживать ранние признаки СПР в режиме повседневной транспортировки газа. Такая система реализует максимально распределенные вычисления по ячейкам сети [6] и обладает преимуществами перед централизованным управлением, поскольку максимум вычислений и принятие самостоятельных решений в рамках разрешенных полномочий акустическим наблюдателем производится локально, без передачи информации в удаленный центр.

Специфика исследований

Задача раннего обнаружения признаков еще не произошедшей, но надвигающейся СПР по акустическим шумам состоит в реконструкции ближайшей из известных произошедших ранее техносферных аварий, параметры которых хранятся в базе знаний, а также в синтезе сценарного прогноза аварийной ситуации и эффективных контрмер с все более достоверным уточнением рас-

четных параметров по мере приближения к моменту аварии. Общими признаками наступления ЧС могут быть нехарактерные для нормальной работы визуализированные звуковые образы. Распознанные с помощью алгоритмов обработки визуальной информации аномальные фрагменты акустического спектра дают основания для приведения специальных подразделений в состояние соответствующей готовности. Чтобы акустическая система мониторинга (АСМ) обеспечивала раннее предупреждение о СПР необходимо, чтобы она:

- 1) включала достаточный по количеству, номенклатуре и плотности размещения набор промышленных микрофонов;
- 2) обладала знаниями о визуализированных звуковых образах ранних признаков СПР: инфразвуковом фоне, гуле, скрежете, шорохе, треске, свисте и др.;
- 3) оперировала логикой вывода, позволяющей учитывать условия мониторинга, обрабатывать текущие звуковые данные и прогнозировать ситуацию на достаточный временной горизонт для обеспечения возможности конструирования оптимального сценария предупреждения СПР.

Математическая формализация

Под идентификацией СПР будем иметь в виду такую интерпретацию зарегистрированного набора признаков, которая позволит точно определить класс СПР — K , ее вероятность — P , время наступления — T . Математическая связь между набором признаков и параметрами функции времени СПР может быть записана следующим образом:

$$СПР(K, P, T) = F\{\Pi_1(t), \dots, \Pi_N(t)\} + \xi, \quad (1)$$

где:

$\Pi_i(t)$, $i = 1 \dots N$ — i -й ранний признак в составе кортежа из N признаков;

F — математическая функция связи между набором признаков и уровнем риска;

ξ — случайная ошибка идентификации.

Случайная ошибка идентификации всегда объективно имеет место в силу уникальности и непредсказуемости приближающейся ЧС. Также включение в функционал (1) случайной компоненты ξ позволяет построить обучение модели на основе методологии экстремальной оптимизации по принципу:

$$\xi \xrightarrow{\Pi} \min, \quad (2)$$

или

$$\xi = СПР(K, P, T) - F\{\Pi_1(t), \dots, \Pi_N(t)\} \xrightarrow{\Pi} \min, \quad (3)$$

где:

$СПР(K, P, T)$ — известные данные об уже произошедшей катастрофе.

Оператор (3) можно интерпретировать так, что набор измеряемых признаков Π определяет состояние риска ЧС, которое наиболее близко к аналогичным параметрам одной из ранее произошедших катастроф. Ситуация повышенного риска однозначно характеризуется классом техногенной аварии, временем и вероятностью ее наступления и является функцией

времени от набора распознаваемых визуализированных признаков.

Более детальная постановка задачи на уровне наблюдений за предикторами может быть следующая. Пусть блоком направленных микрофонов наблюдаются и записываются все предикторы X — переменные состояния типового объекта контроля:

$$X(t) = \{X_1(t), \dots, X_M(t)\}. \quad (4)$$

При достоверном наступлении СПР изучается ее предыстория с целью определения распознаваемых состояний, предшествующих СПР, выявления тенденций ее развития, определения и математической формализации надежных (воспроизводимых, статистически устойчивых) признаков.

Проверяются гипотезы на достоверность признаков. Для этого все выявленные аномалии в цифровых потоках акустических данных $X(t)$ на временном отрезке предыстории фиксируются и математизируются в виде переменных Π , слева в выражении которых стоит количественное значение:

$$\Pi(t) = G(X(t)); \quad (5)$$

$$\Pi^* \text{ LOG } \Pi(t), \quad (6)$$

где:

$G(X(t))$ — математическая функция расчета признака по характерным входным данным, приведенная к форме, допускающей сравнение с критическим опорным значением Π^* ;

LOG — логический оператор сравнения из табл. 1.

Таблица 1
Перечень логических операторов для формирования логики отбора признаков

Table 1

A list of logical operators for forming the logic of feature selection

Оператор сравнения (LOG) Comparison Operator (LOG)	Действие Action
=	Равно Equally
>	Больше More
<	Меньше Less
>=	Больше или равно Greater than or equal to
<=	Меньше или равно Less than or equal to
<>	Не равно Not equal to
!=	Не соответствует номиналу Does not match the nominal value
!<	Не меньше At least
!>	Не больше No more
⊆	Включает Includes

В уравнении (5) в левой части $\Pi(t)$ является результатом математического преобразования операм G акустического сигнала — аргумента $X(t)$ с микрофона.

В уравнении (6) уже $\Pi(t)$ является аргументом для логического сравнения с опорным значением Π^* из базы данных при выполнении логического условия (равно, больше и т. д.).

Таблица может быть расширена, комбинации операторов сравнения позволяют реализовать сложную разветвленную многоступенчатую логику идентификации статуса техносферной опасности объекта мониторинга. Модель текущего состояния ГТС определяется функцией, зависящей от совокупности факторов:

$$S = F(X, T, W, V, U, R), \quad (7)$$

где:

X — вектор предикторов;

T — время;

W — внешние природно-производственные факторы влияния на эксплуатационное состояние газораспределительной сети;

V — статистические характеристики цифровых звуковых данных;

U — параметры подстройки АСМ;

R — регулирующие воздействия.

Идентификация состояния производится по наличию признаков, которые:

- зависят от совокупности внешних условий и статистических свойств потоковых данных;

- определяют аварийный статус ГТС в зоне контроля;
- характеризуют признак аварии или признак, предшествующий аварии, с точностью до места и времени.

Решаемые задачи синтеза АСМ:

1. Составить перечень критических состояний ГТС по признаку аварийности: {техносферная безопасность, предшествует аварии (когда, где); авария (когда, где); минимум последствий}:

$$S = \{0, 1, 2, 3\}. \quad (8)$$

2. Составить перечень уникальных признаков, статистически устойчиво характеризующих СПР, т. е. правило перехода:

$$(П_i * П_j) : S \rightarrow S_1. \quad (9)$$

3. Провести превентивную идентификацию рисков с точностью до причин и последствий на основе акустической логической модели СПР ГТС (1) в зоне контроля.

4. Провести синтез регулирующего сценария $U_{10}(R)$ для перевода ГТС из состояния «предшествует аварии» в состояние «техносферная безопасность»:

$$U_{10} = U\{S_1\} \xrightarrow{R_{10}} S_0. \quad (10)$$

5. Провести синтез регулирующего сценария $U_{23}(R)$ для перевода ГТС из состояния «авария» в состояние «минимум последствий»:

$$U_{23} = U\{S_2\} \xrightarrow{R_{23}} S_3. \quad (11)$$

Логика поиска ближайшего вероятного состояния основана на оперировании элементами бинарной матрицы $S - П$ («Состояния – Признаки») (табл. 2).

Таблица 2
Бинарная матрица признаков

Table 2
Binary feature matrix

Статус ТО ГТС Status TO GTS	Признаки Signs									
	$П1$	$П2$	$П3$	$П4$	$П5$	$П6$	$П7$	$П8$	$П9$	$П10$
S_1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
S_2	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Окончание таблицы 2

Статус ТО ГТС Status TO GTS	Признаки Signs									
	<i>п1</i>	<i>п2</i>	<i>п3</i>	<i>п4</i>	<i>п5</i>	<i>п6</i>	<i>п7</i>	<i>п8</i>	<i>п9</i>	<i>п10</i>
S3	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1

Приведенные в таблице статусы аварийности ГТС на самом деле могут определяться множеством сочетаний параметров состояния X предикторов, определенные комбинации уровней которых могут составлять признаки (9). Идеальным набором признаков является такой кортеж, при котором один признак определяет один статус. Идентификация состояния S_i по уникальным признакам основана на идентификации статуса техносферной опасности (ТО) ГТС по совпадению выделенного и зафиксированного специфичным акустическим регистратором единичного уни-

кального признака с однородным опорным признаком из базы данных.

Идентификация статуса S_i по множественным признакам основана на решении задачи обратной логики. Методы решения такой задачи могут быть различными: нейросетевые модели, распознавание образов, поиск наиболее близкого к опорному информационного вектора в многомерном пространстве признаков по критерию, например, Махаланобиса [7]. Уравнение идентификации статуса ГТС можно записать в общем виде:

Если {online рассчитываемая строка признаков ($P(t)$) – {хранящаяся в базе строка признаков матрицы S_{ij} } = 0, (где $i = (1...3)$), то индекс j совпадения S указывает на статус техносферной опасности ГТС. (12)

Статус S_0 для таблицы идентифицируется как остальные состояния, не входящие в обе представленные таблицы, по правилу:

$$S_0 = \{\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2 \cap \bar{S}_3\}. \quad (13)$$

Для идентификации статуса техносферной опасности ГТС по множественным признакам, согласно табл. 2, можно записать, например, статус S_2 в виде логического идентификатора:

$$S_2 = \{p1 \cap p2 \cap p6 \cap p8\} \cup \{p6 \cap p10\} \cup \{p5 \cap p6 \cap p7\}. \quad (14)$$

Определение текущего статуса техносферной опасности функционально обеспечивается программной реализацией модуля идентификации СПР, синтезированного на основе (1)–(14).

Заключение

Дальнейшее развитие исследований ВНИИГАЗ совместно с Российской академией

наук направлено на выбор вариантов аппаратно-программных решений для создания типовой АСМ, адаптирующейся под широкие диапазоны условий работы ГТС: зашумленность, многорежимность, внезапное возникновение инцидентов и др. Полученные промежуточные результаты обследования акустических спектров объектов газоперерабатывающего производства показывают высокую потенциальную информативность си-

стем такого типа, возможность практической реализации и масштабирования решения автоматического акустического мониторинга

околообъектового и внутриобъектового пространства ГТС, а также сопряжения локальных ячеек в умную акустическую сенсорную сеть.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СТО Газпром газораспределение 8.6-0-2016. Промышленная и пожарная безопасность, охрана труда, охрана окружающей среды. Единая система управления охраной труда и промышленной безопасностью в АО «Газпром газораспределение». Основные положения : стандарт организации : утвержден и введен в действие распоряжением АО «Газпром газораспределение» от 27.12.2016 № 81-Р/48. 2016. 127 с. Электронная версия печ. изд. URL: <https://www.vladoblgaz.ru/zagruzki/СТО%20ГП%20ГР%208.6-0-2016.pdf> (дата обращения: 08.05.2025).

2. Терехов А. Л., Чубуков Н. Н. Раннее предупреждение чрезвычайных ситуаций на основе акустического мониторинга объектов нефтяной и газовой промышленности // Газовая промышленность. 2025. № 6.

3. Чубуков Н. Н. Возможные пути повышения качества экологического менеджмента оборонных предприятий // Вооружение и экономика. 2011. № 1 (13). С. 94–104.

4. Терехов А. Л., Семенцев А. М. Контроль состояния рабочих мест как инструмент повышения безопасности труда на объектах ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2023. № 1. С. 20–26.

5. Обзор технических решений по снижению шума на предприятиях добычи и транспорта газа / А. Л. Терехов [и др.] // Материалы Международной акустической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Е. Я. Юдина. М., 2014. С. 257–267.

6. Чубуков Н. Н. Анализ проблем и перспективы интеллектуализации транспортных сетей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8.

7. Mahalanobis P. C. On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. Т. 2, № 1. pp. 49–55.

REFERENCES

1. Gazprom Gas distribution service station 8.6-0-2016. Industrial and fire safety, labor protection, environmental protection. Unified occupational health and industrial safety management system at Gazprom Gazoraspredenie JSC. The main provisions : the standard of the organization : approved and put into effect by order of Gazprom Gas Distribution JSC dated 27.12. 2016 № 81-R/48. 2016. 127 p. Electronic version of the печ. ed. URL: <https://www.vladoblgaz.ru/zagruzki/СТО%20ГП%20ГР%208.6-0-2016.pdf> (date of application: 08.05.2025).

2. Terekhov A. L., Chubukov N. N. Early warning of emergency situations based on acoustic monitoring of oil and gas industry facilities // Gas industry. 2025. № 6.

3. Chubukov N. N. Possible ways to improve the quality of environmental management of defense enterprises // Armament and Economics. 2011. № 1 (13). pp. 94–104.
4. Terekhov A. L., Sementsev A. M. Workplace health monitoring as a tool for improving occupational safety at Gazprom facilities // Gas Industry. 2023. № 1. pp. 20–26.
5. Review of technical solutions for noise reduction at gas production and transport enterprises / A. L. Terekhov et al. // Proceedings of the International Acoustic Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of E. Y. Yudin. M., 2014. pp. 257–267.
6. Chubukov N. N. Analysis of problems and prospects of intellectualization of transport networks // Mechatronics, automation, control. 2014. № 8.
7. Mahalanobis P. C. On the generalised distance in statistics. // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. T. 2, № 1. pp. 49–55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волынец Игорь Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Российская Федерация, Московская область, г. о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1); AuthorID: 290695; e-mail: I_Volynets@vniigaz.gazprom.ru

Терехов Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Российская Федерация, Московская область, г. о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1); AuthorID: 449959; e-mail: a_terekhov@vniigaz.gazprom.ru

Чубуков Николай Николаевич, соискатель ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (142717, Российская Федерация, Московская область, г. о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1); AuthorID: 1009887; e-mail: metrolog.pribor@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor G. Volynets, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Gazprom VNII-GAZ LLC (15, building Gazovikov str., Razvilka settlement, Leninsky District, Moscow Region, 142717 Russian Federation); AuthorID: 290695; e-mail: I_Volynets@vniigaz.gazprom.ru

Alexey L. Terekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Gazprom VNIIGAZ LLC (15, building Gazovikov str., Razvilka settlement, Leninsky District, Moscow Region, 142717 Russian Federation); AuthorID: 449959; e-mail: a_terekhov@vniigaz.gazprom.ru

Nikolay N. Chubukov, applicant, Gazprom VNIIGAZ LLC (15, building Gazovikov str., Razvilka settlement, Leninsky District, Moscow Region, 142717 Russian Federation); AuthorID: 1009887; e-mail: metrolog.pribor@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2025
Одобрена после рецензирования 22.05.2025
Принята к публикации 15.09.2025