

Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники

Алексей Николаевич Григорьев, Виктор Борисович Захаревский,
Дмитрий Сергеевич Евтеев, Сергей Николаевич Аникин ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное развитие экономики и технологий приводит к увеличению числа подземных сооружений, что поднимает вопросы организации тушения пожаров в них в случае необходимости. Статистические данные показывают, что время тушения в подземных сооружениях значительно превышает среднее для других пожаров, при этом пожары в коллекторах представляют собой пожары повышенной сложности частного характера. В опубликованных работах, посвященных пожарам в подземных сооружениях, вопрос тушения пожаров в коллекторах при помощи специальной техники газового тушения не изучен.

Цель. Совершенствование методов тушения пожаров в подземных коллекторах для инженерных коммуникаций путем применения углекислого газа.

Задачи. Анализ оперативных действий пожарных подразделений при тушении пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций и опасных факторов, сопутствующих тушению пожаров в них; аналитическое обоснование возможности тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения на примере автомобиля газового тушения АГТ-1; формализация значений секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа в виде номограмм в сопряжении с объемом помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1.

Аналитическая часть. Алгоритм оптимизации выбора численности сил и средств, а также количества огнетушащих веществ для тушения пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций основан на аналитическом расчете оснащенности пожарных подразделений, геометрических параметров коллекторов и условий, обеспечивающих герметичность помещения.

Выводы. Проведена оценка использования автомобиля газового тушения АГТ-1 в подземных коллекторах до 1000 м³. На основе аналитических расчетов представлены формализованные данные и номограммы для расчета параметров тушения подземных коллекторов, разработан алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества. Доказана эффективность применения автомобиля газового тушения для ликвидации пожаров в кабельных линиях под напряжением и после его снятия.

Ключевые слова: подземный коллектор; горение кабеля; автомобиль газового тушения; коэффициент герметичности; кабельные коммуникации

Для цитирования: Григорьев А.Н., Захаревский В.Б., Евтеев Д.С., Аникин С.Н. Обоснование возможности пожаротушения углекислым газом коллекторов инженерных коммуникаций с использованием передвижной пожарной техники // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 5. С. 78–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.78-86

✉ Аникин Сергей Николаевич, e-mail: neytrinos@mail.ru

Substantiation of the possibility of carbon dioxide fire extinguishing of utility collectors using mobile fire-fighting equipment

Alexey N. Grigoriev, Viktor B. Zakharevskiy, Dmitriy S. Evteev, Sergey N. Anikin ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern development of economy and technology leads to an increase in the number of underground structures, which raises the issues of fire extinguishing organization in them in case of necessity. Statistical data show that the extinguishing time in underground structures is much longer than the average for other fires, while fires in collectors are fires of increased complexity of private nature.

In the published works devoted to fires in underground structures, the issue of extinguishing fires in collectors using special gas extinguishing equipment is not studied.

Purpose. Improvement of methods of fire extinguishing in underground collectors for engineering communications by using of carbon dioxide.

Tasks. Analysis of operational actions of fire departments when extinguishing fires in collectors for engineering communications and analysis of dangerous factors accompanying fire extinguishing in them; analytical substantiation of the possibility of extinguishing carbon dioxide in collectors for engineering communications by mobile fire extinguishing means, using the example of a gas extinguishing vehicle AGT-1; formalization of values of the second consumption of a fire barrel when carbon dioxide is supplied in the form of nomograms in conjunction with the volume of the room, which can be extinguished by the gas extinguishing vehicle AGT-1.

The analytical part. The algorithm of optimization of the choice of the number of forces and means, as well as the quantity of fire extinguishing agents for extinguishing fires in collectors for engineering communications is based on an analytical calculation of the equipment of fire departments, geometric parameters of collectors and conditions ensuring the tightness of the room.

Conclusions. The article evaluates the use of gas extinguishing vehicle (AGT-1) in underground collectors up to 1000 m³. On the basis of analytical calculations, the formalized data and nomograms for calculation of parameters of extinguishing underground collectors are presented, the algorithm of a choice of extinguishing substances and their quantity is developed. The efficiency of application of gas extinguishing vehicle for liquidation of fires in cable lines under voltage and after its removal is proven.

Keywords: underground collector; cable burning; gas extinguishing vehicle; tightness coefficient; cable communications

For citation: Grigoriev A.N., Zakharevskiy V.B., Evteev D.S., Anikin S.N. Substantiation of the possibility of carbon dioxide fire extinguishing of utility collectors using mobile fire-fighting equipment. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):78-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.78-86 (rus).

✉ Sergey Nikolaevich Anikin, e-mail: neytrinos@mail.ru

Введение

Современное развитие экономики и постоянное совершенствование производства, активное внедрение передовых технологий стимулируют увеличение числа подземных сооружений разнообразного назначения. Под подземными сооружениями понимаются сооружения, находящиеся ниже поверхности земли и служащие для различных целей. Вопросы безопасности при их эксплуатации являются приоритетными. В зарубежных странах также уделяется серьезное внимание данной проблеме [1–4], в частности рассматриваются вопросы тушения подземных сооружений инертным газом [5], в том числе при наличии силовых агрегатов и кабелей, повышающих риски возникновения пожара [6].

В процессе строительства, реконструкции, эксплуатации, ликвидации или консервации таких объектов могут возникать сложные задачи, связанные с аварийно-спасательными работами, и их решение, как правило, лежит в компетенции военнизированных горноспасательных частей. Однако в случае тушения пожаров в подземных сооружениях, таких как метрополитены, подземные парковки, коллекторы или кабельные каналы; при возникновении пожаров на промышленных предприятиях, включая тоннели, коллаидеры и убежища, ответственность за проведение подобных операций возлагается на Государственную про-

тивопожарную службу МЧС России или другие пожарные службы, предусмотренные законодательством.

Проведенный анализ эффективности оперативных действий при тушении пожаров в подземных сооружениях демонстрирует, что время, затрачиваемое на локализацию и полное устранение пожара в таких местах, заметно превышает средний показатель времени, затрачиваемого на тушение других типов пожара, который в 2020 г. составил 15,72 мин [7]. Анализ данных из статистических сборников «Пожары и пожарная безопасность» ВНИИПО за 2015–2019 гг. [8–12] показывает, что среднее по стране время прибытия первого пожарного подразделения к месту вызова имеет тенденции к увеличению (с 2015 по 2020 г. увеличилось на 11,4 %). В ходе изучения открытых научных и литературных источников за последние 10 лет выявлено, что публикаций по данной тематике практически нет. При этом тушение пожаров в подземных инженерных коммуникациях имеет ряд особенностей, касающихся как организации тушения пожара, так и способов, приемов и методов тушения.

Цель исследования заключается в повышении эффективности управления пожарными подразделениями на пожаре с применением в качестве огнетушащего вещества углекислого газа в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными

средствами пожаротушения на примере автомобиля газового тушения АГТ-1 посредством разработки нового алгоритма поддержки управленческого решения.

Для этого поставлены и решены следующие задачи:

- проанализированы (по описаниям пожаров) оперативные действия пожарных подразделений при тушении пожаров в коллекторах;
- перечислены сложности, с которыми сталкивается личный состав подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в коллекторах для инженерных коммуникаций;
- аналитически обоснована возможность тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения;
- формализованы (на основе физического эксперимента) в виде номограмм значения: секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа; объема помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1;
- представлен алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества с целью тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций.

Теоретические основы организации тушения пожаров в коллекторах

Главной боевой задачей подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в соответствии с Боевым уставом является проведение боевых действий по тушению пожаров на месте пожара для спасения людей, достижения локализации и ликвидации пожара в кратчайшие сроки¹. При решении основной боевой задачи необходимо установить взаимосвязь между возможностями пожарных подразделений и пространственно-временными параметрами пожара. Тактические возможности главным образом определяются технической оснащенностью тактических подразделений и профессиональной подготовленностью личного состава. На реализацию этих возможностей оказывают влияние внешние факторы, возникающие на пожаре.

В полной мере с перечисленными сложностями при тушении крупных пожаров сталкиваются пожарные подразделения в коллекторах для инженерных коммуникаций.

При эффективной реализации ключевой боевой задачи с обеспечением безопасных условий

ведения боевых действий в коллекторах для инженерных коммуникаций предлагается использовать автомобиль газового тушения АГТ-1, для информационно-аналитической поддержки принимаемых решений руководителем тушения пожара (РТП) — алгоритм обоснования ресурсов пожарных подразделений для тушения пожаров в коллекторе для инженерных коммуникаций автомобилями газового тушения.

Пожары в коллекторах развиваются стремительно и пожарные подразделения из-за ограничений, прежде всего по охране труда, не могут реализовать свои возможности по тушению пожара на начальном этапе его развития. Необходимое количество пожарных подразделений прибывает с задержкой, что увеличивает время локализации пожара и ущерб от него. Кроме того, площадь пожара при значительном времени развития пожара может достигнуть максимальных размеров и распространиться на весь отсек коллектора. Поэтому основным условием локализации пожара в минимальные сроки может стать использование безопасного с точки зрения применения личным составом огнетушащего вещества.

Анализ пожаров в коллекторах показал, что к распространению пожаров до крупных размеров приводит длительное свободное развитие горения из-за вынужденных существенных затрат времени на отключение электроэнергии для обеспечения безопасности личного состава на пожаре. Как следствие, первоочередной управленческой задачей РТП является уменьшение времени подачи огнетушащих веществ для локализации пожара. Температура у выхода из отсека кабельного коллектора через 50–60 мин горения достигает 1200 °С и более. Влияние на реализацию управленческого решения РТП оказывает высокая среднеобъемная температура в коллекторах и скоростью ее нарастания 300–400 °С/мин. Это объясняется тем, что горят кабели, длительное время находящиеся под токовой нагрузкой, изоляция которых нагревается изнутри до температуры 800 °С и выше; наблюдалось (иногда) одновременное воспламенение кабелей в нескольких местах и на значительной длине, вследствие прогрева изоляции до температуры самовоспламенения; отмечаются также: большая пожарная нагрузка в виде горючей изоляции (до 16–20 кг/м² или 220–1200 МДж/м²); удельная массовая скорость выгорания электрокабелей достигает 0,055 кг/(м²·с); предварительный прогрев электрокабелей по всей длине в результате прохождения токов в рабочем режиме; силовые кабели прекращают гореть после снятия с них напряжения; чрезвычайно плотное задымление высокотоксичными продуктами горения кабелей; высокая

¹ Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444 «Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ».

скорость распространения горения по кабелям. Скорость распространения горения в горизонтальном кабельном коллекторе, при прокладке кабеля по металлическим кронштейнам и снятом напряжении, составляет 0,1–0,4 м/мин. При наличии напряжения на кабелях и работе естественной общеобменной вентиляции линейная скорость может достигать 1,4 м/мин; наличие нагретого водяного пара из воды, подаваемой на тушение после снятия напряжения с кабелей; стекание расплавленных горящих масс изоляции; наличие горючего стекающего плава изоляции, масел из рубашки охлаждения; наличие в составе продуктов горения хлористого водорода, вызывающего ожоги открытых участков тела пожарных и затрудняющего поиск места горения; наличие рядом расположенных электроустановок и транзитных кабелей под напряжением; стесненные условия работы пожарных подразделений, участвующих в тушении пожара; необходимость применения звеньев газодымозащитников, дымососов; протяженность и сложная компоновка (вертикальные, горизонтальные, наклонные коммуникации) в кабельных сооружениях и коммуникациях; необходимость проведения действий по заземлению пожарных насосов, приборов подачи огнетушащих веществ, электрозащиты самих пожарных даже после получения письменного допуска на тушение; отсутствие на вооружении тактических подразделений приборов и устройств, с помощью которых можно определить отключение кабельных линий в коллекторе [13], — все это обосновывает необходимость применения таких методов и способов подачи огнетушащих веществ, которые обеспечили бы безопасную и одновременно эффективную ликвидацию горения кабельного хозяйства.

Порядок тушения пожаров обесточенных кабельных линий прописан в рекомендациях МВД СССР 1987 и 1991 гг.

После снятия напряжения с кабельных линий для тушения пожара могут быть использованы огнетушащие средства: углекислота, распыленная вода, воздушно-механическая пена, в отдельных случаях — порошковые огнетушащие составы (ПОС) или огнетушащие вещества в сочетаниях (пар, инертные газы). Возможно применение распыленной воды от пожарных стволов с требуемой интенсивностью не менее 0,24 л/(м²·с), подаваемой от пожарных автомобилей [13].

Перечисленные выше средства тушения пожара будут эффективными и безопасными при применении личным составом только при обесточивании кабельных линий. На начальном этапе без снятия напряжения проход пожарных подразделений в отсек коллектора невозможен. В этом случае наиболее результативным для применения огне-

тушащим веществом для тушения пожара в коллекторе независимо от его планировки может быть газ [14, 15], особенно, если подземное сооружение является достаточно крупным по объему [16]. Его подача реализует метод фактической поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями, которую можно идентифицировать как «пространственно-временной метод». Сущность пространственно-временных методов поддержки управления и принятия решений при ведении боевых действий пожарно-спасательными подразделениями заключается в выделении сил и средств на тушение пожара в зависимости от площади (объема) тушения, которые в свою очередь могут быть уточнены путем применения систем видеонаблюдения и контроля [17]. Методика их использования заключается в сравнении скорости роста площади тушения, обеспечиваемой средствами подачи огнетушащих веществ, и скорости роста площади пожара. В перспективе также можно было бы применять информацию о геометрических параметрах коллектора с помощью цифрового двойника [18].

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследований с применением газовых составов показал хорошие результаты, полученные при тушении пожаров коллекторов [19, 20].

Время подачи углекислого газа и его количество на тушение пожара определяется расчетом на основании характеристики коллектора и средств подачи углекислого газа, но не более 20 мин.

Для обоснования необходимой численности и технической оснащенности тактического подразделения пожарной охраны для реализации возможного тушения с подачей СО₂ необходимо в первую очередь определить геометрические параметры коллектора, а также долю объема в нем кабельных систем, которая, как правило, составляет не более 10 % от общего объема помещения.

Следует учитывать, что разделки коллектора не являются герметичными, соответственно, опасные факторы пожара могут распространиться через них в смежные коммуникации. Возможность организации тушения помещения углекислым газом оценивается через коэффициент негерметичности, который выражается как:

$$\delta = \frac{\sum F_n}{W_p},$$

где F_n — общая площадь проемов, м²;

W_p — объем защищаемого помещения, м³.

Таким образом, после вычисления геометрических параметров коллектора (объем помещения) рассчитывается количество СО₂, необходимое для

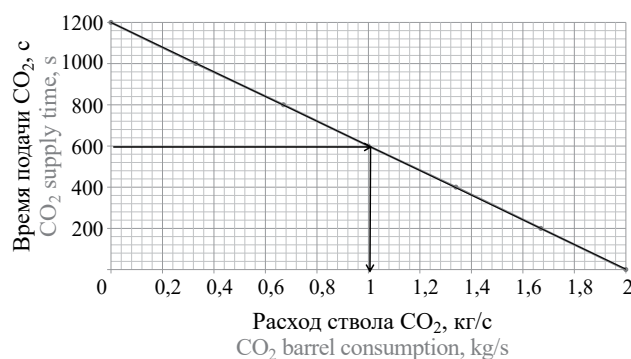


Рис. 1. Номограмма определения секундного расхода пожарного ствола по углекислоте (ключ — при времени подачи углекислоты 600 с расход ствола составит не менее 1 кг/с)

Fig. 1. Nomogram for determining the second consumption of a fire barrel by carbon dioxide (the key is that with a carbon dioxide supply time of 600 s, the barrel consumption will be at least 1 kg per second)

пожаротушения мобильными средствами пожаротушения, с учетом температуры в коллекторе, которая обычно не опускается ниже +5 °С.

Масса CO₂, требуемого для пожаротушения, определяется по формуле:

$$M_p = V_p \rho_1 (1 + K_2) \ln \frac{100}{100 - C_n},$$

где ρ_1 — плотность газового огнетушащего вещества с учетом высоты расположения защищаемого объекта относительно уровня моря для минимальной температуры в помещении, кг/м³;

K_2 — коэффициент, учитывающий потери газового огнетушащего вещества через проемы в ограждении помещения;

C_n — нормативная огнетушащая концентрация, %².

К примеру, необходимая масса углекислого газа для тушения пожара в распространенном типе коллектора для коммуникаций высотой 2,5 м, шириной 2,5 м и протяженностью 150 м составит около 740 кг и может быть обеспечена автомобилем газового тушения АГТ-1, нормативная перевозимая масса огнетушащего вещества у которого составляет 1000 кг. Оценка количества стволов для обеспечения тушения может быть проведена при помощи номограммы, указанной на рис. 1, а количество огнетушащего вещества, необходимого для тушения, по номограмме на рис. 2.

Требуемая масса газового огнетушащего состава в автомобиле газового тушения АГТ-1 для тушения пожара в объеме помещения определяется по номограмме (см. рис. 2).

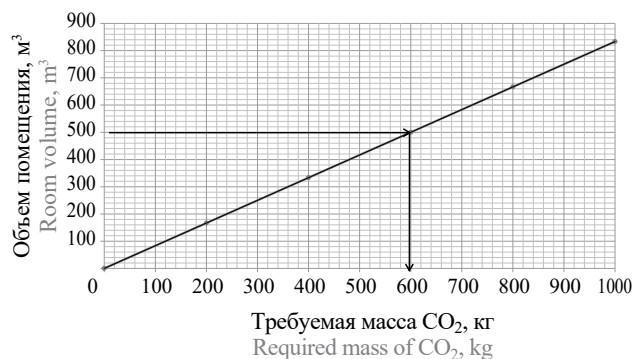


Рис. 2. Требуемая масса газового огнетушащего состава для тушения пожара в объеме помещения (ключ — для тушения пожара в объеме помещения 500 м³ требуется 600 кг CO₂)

Fig. 2. The required mass of gas extinguishing agent for extinguishing a fire in the volume of the room (the key is that 600 kg of CO₂ is required to extinguish a fire in the volume of the room 500 m³)

Для доставки огнетушащего состава к месту пожара можно и целесообразно использовать автомобиль газового тушения (АГТ-1). Масса огнетушащего состава составляет 1000 кг. При выполнении условий герметизации помещения такого количества должно хватить для тушения пожара объемным способом до 1000 м³. Имеющимся на автомобиле стволом (расход 2 кг/с) возможно добиться огнетушащей концентрации газа по всему объему помещения, так как требуемый расход на тушение составляет 0,62 кг/с.

Для оптимизации выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций разработан алгоритм, представленный на рис. 3.

Выводы

На основе новых исходных данных (секундный расход пожарного ствола при подаче углекислого газа в объем помещения) получено новое знание (возможность тушения пожара углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций передвижной пожарной техникой) в соответствии с возможностями привлекаемых для этого пожарными подразделениями. Разработан алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества (углекислый газ) для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций.

Проведенный анализ (по описаниям пожаров) оперативных действий пожарных подразделений в коллекторах для инженерных коммуникаций позволил выделить 20 признаков (параметров), оказывающих влияние на ведение боевых действий пожарных подразделений, аналитически обоснована возможность тушения углекислым газом в коллекторах для инженерных коммуникаций мобильными средствами пожаротушения на примере отсека кол-

² СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

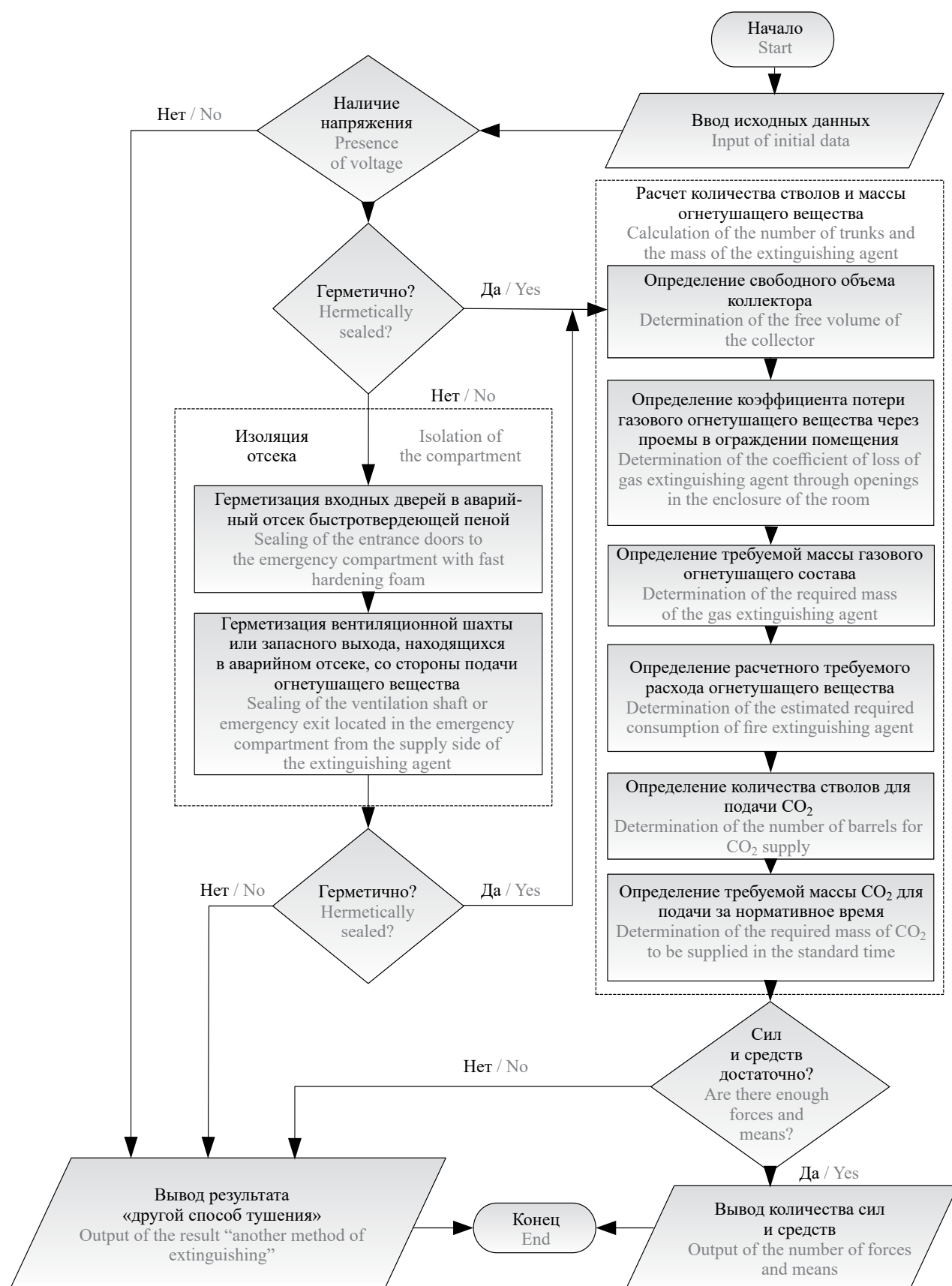


Рис. 3. Алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций

Fig. 3. Algorithm for selecting fire extinguishing agents and their quantity for extinguishing a fire in a collector for engineering communications

лектора при помощи автомобиля газового тушения АГТ-1, также обосновано преимущество применения газовых составов от передвижной пожарной техники перед автоматической системой пожаротушения, которое состоит в том, что сработавшая автоматическая система не может локализовать пожар вследствие негерметичности помещения отсека на момент пожара и огнетушащая концентрация газового огнетушащего состава не возникает. Пожарные подразделения в ходе разведки пожара и подачи стволов обеспечивают герметичность отсека, достигают ликвидации пожара в минимальные сроки.

Формализованы в виде номограмм значения: секундного расхода пожарного ствола при подаче углекислого газа; объема помещения, который может быть потушен автомобилем газового тушения АГТ-1; алгоритм выбора огнетушащих веществ и их количества для тушения пожара в коллекторе для инженерных коммуникаций; доказано, что автомобиль газового тушения АГТ-1 может быть применен на любом

коллекторе для инженерных коммуникаций, независимо от оснащения коллектора автоматической установкой пожаротушения и времени снятия напряжения с кабельных линий, что повышает эффективность оперативных действий пожарных подразделений. Время подачи газового огнетушащего состава для тушения пожара составит не более 20 мин.

Проведена адаптация методики расчета массы газового огнетушащего вещества для автоматических установок газового пожаротушения при тушении объемным способом для мобильных средств пожаротушения (время подачи CO_2 с нормативных 20 с до минимально возможных по тактико-техническим характеристикам автомобиля АГТ-1 20 мин).

Доказана целесообразность применения автомобиля газового тушения по тушению пожаров коллекторов для инженерных коммуникаций, как наиболее эффективного средства тушения пожаров кабельных линий под напряжением и после снятия напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Lanchava O. et al.* Prospects of usage of transforming systems for extinguishing fire in tunnels // International Scientific Conference “Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas”. Tbilisi. 2009. Pp. 302–308.
2. *Carvel R.* Fire protection in concrete tunnels // The Handbook of Tunnel Fire Safety. Thomas Telford Publishing. London, 2005. Pp. 110–126.
3. *Lin C.L., Chien C.F.* Lessons learned from critical accidental fires in tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 113. P. 103944. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103944
4. *Palm A., Kumm M., Ingason H.* Full-scale tests of alternative methods for fire fighting in underground structures // Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security. Marseille, France. March 12–14, 2014. Pp. 573–582.
5. *Song W. et al.* Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques — an overview // Archives of Mining Sciences. 2021. Vol. 66. Issue 2. DOI: 10.24425/ams.2021.137463
6. *Zhou J. et al.* Evolution Behaviors and Properties of Power Compartment Fires in Underground Urban Utility Tunnels : a review // 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE. 2023. Pp. 771–778. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10165832
7. *Полехин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Чечетина Т.А.* Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : статистич. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2021. 112 с.: ил. 5.
8. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году : стат. сб. / под ред. А.В. Матюшина. М. : ВНИИПО, 2016. 124 с.: ил. 40.
9. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2017. 124 с.: ил. 40.
10. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2018. 125 с.: ил. 42.
11. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2019. 125 с.: ил. 42.
12. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : стат. сб. / под ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.: ил. 30.
13. *Григорьев А.Н., Подгруппный А.В.* Тактические приемы и способы тушения пожаров в кабельных коллекторах для инженерных коммуникаций оперативными подразделениями пожарной охраны // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 1. С. 75–82.
14. *Niu Y., Li W.* Simulation study on value of cable fire in the cable tunnel // Procedia Engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 569–573. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.100
15. *Marke P.* Cable tunnels — an integrated fire detection/suppression system for rapid extinguishment // Fire technology. 1991. Vol. 27. Pp. 219–233. DOI: 10.1007/BF01038448

16. Kun-sheng L.I. et al. Experimental study on carbon dioxide gas fire extinguishing technology in large buried cable tunnel // *Fire Science and Technology*. 2022. Vol. 41. Issue 7. P. 954.
17. Shahrour I. et al. Smart monitoring system for risk management in the underground space // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019. Vol. 281. P. 01005. DOI: 10.1051/mateconf/201928101005
18. Lee J. et al. Implementing a Digital Twin of an Underground Utility Tunnel for Geospatial Feature Extraction Using a Multimodal Image Sensor // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 16. P. 9137. DOI: 10.3390/app13169137
19. Ge L. et al. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 142. Pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.005
20. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Тушение углекислым газом пожаров в закрытых помещениях // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф., Москва, 16–17 ноября 2016 г. М. : НИУ МГСУ, 2017. С. 353–357.

REFERENCES

1. Lanchava O. et al. Prospects of usage of transforming systems for extinguishing fire in tunnels. *International Scientific Conference “Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas”*. Tbilisi. 2009; 302-308.
2. Carvel R. Fire protection in concrete tunnels. *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. Thomas Telford Publishing, London. 2005; 110-126.
3. Lin C.L., Chien C.F. Lessons learned from critical accidental fires in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021; 113:103944. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103944
4. Palm A., Kumm M., Ingason H. Full-scale tests of alternative methods for fire fighting in underground structures. *Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security*. Marseille, France. March 12–14, 2014. 2014; 573-582.
5. Song W. et al. Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques — an overview. *Archives of Mining Sciences*. 2021; 66(2). DOI: 10.24425/ams.2021.137463
6. Zhou J. et al. Evolution Behaviors and Properties of Power Compartment Fires in Underground Urban Utility Tunnels : a review. *2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. IEEE. 2023; 771-778. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10165832
7. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Kozlov A.A., Firsov A.G., Sibirko V.I., Goncharenko V.S., Chechetina T.A. Under the gen. ed. of D.M. Gordienko. *Fires and fire safety in 2020 : statistical collection*. 2021; 112: fig. 5 (rus).
8. Matyushin A.V. *Fires and fire safety in 2015 : statistical collection*. 2016; 124: fig. 40 (rus).
9. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2016 : statistical collection*. 2017; 124: fig. 40 (rus).
10. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2017 : statistical collection*. 2018; 125: fig. 42 (rus).
11. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2018 : statistical collection*. 2019; 125: fig. 42 (rus).
12. Gordienko D.M. *Fires and fire safety in 2019 : statistical collection*. 2020; 80: fig. 30 (rus).
13. Grigoryev A.N., Podgrushnyy A.V. Tactical techniques and methods of extinguishing fires in cable collectors for engineering communications by operational fire protection units. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2009; 1:75-82 (rus).
14. Niu Y., Li W. Simulation study on value of cable fire in the cable tunnel. *Procedia Engineering*. 2012; 43:569-573. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.100
15. Marke P. Cable tunnels — an integrated fire detection/suppression system for rapid extinguishment. *Fire technology*. 1991; 27:219-233. DOI: 10.1007/BF01038448
16. Kun-sheng L.I. et al. Experimental study on carbon dioxide gas fire extinguishing technology in large buried cable tunnel. *Fire Science and Technology*. 2022; 41(7):954.
17. Shahrour I. et al. Smart monitoring system for risk management in the underground space. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2019; 281:01005. DOI: 10.1051/mateconf/201928101005
18. Lee J. et al. Implementing a Digital Twin of an Underground Utility Tunnel for Geospatial Feature Extraction Using a Multimodal Image Sensor. *Applied Sciences*. 2023; 13(16):9137. DOI: 10.3390/app13169137
19. Ge L. et al. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 142:174-190. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.005
20. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Extinguishing fires with carbon dioxide in enclosed spaces. *Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education Proceedings of the International Scientific Conference*. Moscow, 2017; 353-357 (rus).

Поступила 30.05.2023, после доработки 07.09.2023;
принята к публикации 18.09.2023

Received May 30, 2023; Received in revised form September 7, 2023;
Accepted September 18, 2023

Информация об авторах

ГРИГОРЬЕВ Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcuring@mail.ru

ЗАХАРЕВСКИЙ Виктор Борисович, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

ЕВТЕЕВ Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0003-1642-2358; SPIN: 7499-0486; e-mail: garnett21@list.ru

АНИКИН Сергей Николаевич, адъюнкт кафедры пожарной тактики и службы в составе УНК пожаротушения, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; ORCID: 0000-0002-8996-0192; SPIN: 9419-3590; e-mail: neytrinos@mail.ru

Вклад авторов:

Григорьев А.Н. — идея; научное руководство.

Захаревский В.Б. — сбор материала.

Евтеев Д.С. — написание статьи.

Аникин С.Н. — обработка материала; научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Alexey N. GRIGORIEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcuring@mail.ru

Viktor B. ZAKHAREVSKIY, Senior Lecturer of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

Dmitriy S. EVTEEV, Senior Lecturer of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1642-2358; SPIN: 7499-0486; e-mail: garnett21@list.ru

Sergey N. ANIKIN, Postgraduate at the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Educational and Scientific Fire-Fighting Complex), the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8996-0192; SPIN: 9419-3590; e-mail: neytrinos@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexey N. Grigoriev — idea; scientific guidance.

Viktor B. Zakharevskiy — collection of material.

Dmitriy S. Evteev — writing an article.

Sergey N. Anikin — material processing; scientific editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.