

В ЭТОМ НОМЕРЕ:**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ****СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ФИКСАЦИИ ВЕЩНОЙ
ОБСТАНОВКИ НА МЕСТЕ ПОЖАРА**Сысоева Т. П., Лобова С. Ф., Мусиенко Т. В., Кухарев А. А. **2****ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**Беззапонная О. В., Злобина С. В., Динисламов М. М., Выгузова Е. В. **13****ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ НУЖД
ПОЖАРОТУШЕНИЯ**Двоенко О. В., Щербаков Н. А., Захаров А. И. **24****ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТУШЕНИИ
ПЛАМЕНИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ВОДЯНЫМ ТУМАНОМ**Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. **37****ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕКОТОРЫХ
НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ
УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ**Гужва А. А., Скрипник И. Л., Каверзнева Т. Т., Румянцева Н. В. **49****РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПЕРЕГРЕВА И ВОЗГОРАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**Сачков И. Н., Куанышев В. Т., Кобелев А. М. **60****ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ И ТУШЕНИЯ
ПОЖАРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ОБСТАНОВКИ С ПОЖАРАМИ**Штерензон В. А., Худякова С. А., Шпаньков А. В. **71****ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
ТЕПЛОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ
АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРЫ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ
МАТЕРИАЛОВ**Корнилов А. А., Бородин А. А. **90**

УДК 614.841.2

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ФИКСАЦИИ ВЕЩНОЙ ОБСТАНОВКИ НА МЕСТЕ ПОЖАРА**Сысоева Татьяна Павловна, Лобова Софья Федоровна,
Мусиенко Томара Викторовна, Кухарев Александр Александрович**

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

АННОТАЦИЯ

Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа различных методик фиксации осмотра места пожара в ходе статического осмотра, оценка используемых методик, определение комплексного подхода, выявление положительных и отрицательных результатов применения той или иной методики. Актуальность данного исследования является важной составляющей в изучении широкого спектра криминалистических методик, способных повлиять и улучшить методику осмотра места пожара, поскольку именно от этого этапа напрямую зависит дальнейшее расследование по установлению очага, причины пожара и путей его распространения. В то же время необходимо провести сравнительное исследование, поскольку это позволит определить конкретные проблемы при использовании той или иной методики, а также поможет понять ее эффективность. Также следует отметить тот факт, что технологии не стоят на месте и использование «устаревших» методик может существенно влиять на проведение осмотра места пожара. Следовательно, понимание данного процесса позволит разработать комплекс мероприятий, при котором осмотр места пожара будет наиболее эффективным. В процессе исследования мы сравнивали между собой методики фиксации с помощью протокола осмотра места пожара, фотосъемки, панорамной фотосъемки с углом обзора 180° и фиксации места пожара с помощью 3D-сканирования. В ходе проведенных практических исследований были сделаны выводы по каждому методу фиксации места пожара с приведенными примерами и раскрыты их функциональные возможности, способствующие качественному и быстрому осмотру места происшествия. Также были выявлены неэффективные стороны данных методов, требующие особенного внимания и доработки. По итогам проведенных исследований было предложено применять комплексно все перечисленные способы фиксации места пожара. Так как каждый из них дополняет друг друга в процессе исследования места пожара, что поможет ускорить работу дознавателя, а также поможет пожарно-техническому эксперту при ответах на поставленные перед ним вопросы. Данная тема научного исследования никогда не перестанет быть актуальной, потому что количество пожаров, к сожалению, не уменьшается в нашем современном мире, а технологии не стоят на месте. Но, как показала практика, и первоначальные методы фиксации не устарели и приносят свою пользу, а современные технические оснащения помогают им в этом.

Ключевые слова: протокол осмотра места пожара, панорамная фотосъемка, 3D-сканирование, расследование места пожара

COMPARATIVE STUDY OF METHODS OF FIXING THE MATERIAL SITUATION AT THE FIRE SITE**Tatiana P. Sysoeva, Sofia F. Lobova, Tamara V. Musienko, Alexander A. Kukharev**

Saint Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

The purpose of this study is to conduct a comparative analysis of various methods of fixing the inspection of the fire site during a static inspection, evaluation of the methods used, determination of an integrated approach, identification of positive and negative results of the application of a particular technique. The relevance of this study is an important component in the study of a wide range of forensic techniques that can influence and improve the methodology of examining the fire site, since it is from this stage that further investigation to establish the hearth, the cause of the fire and the ways of its spread directly depends. At the same time, it is necessary to conduct a comparative study, since this will help to identify specific problems when using a particular technique, as well as help to understand its effectiveness. It should also be noted that technologies do not stand still and the use of "outdated" techniques can significantly affect the inspection of the fire site. Therefore, understanding this process will allow us to develop a set of measures in which the inspection of the fire site will be most effective. In the course of the study, we compared the methods of fixing with the help of the protocol of inspection of the fire site, photographing, panoramic photographing with a viewing angle of 180 degrees and fixing the fire site using 3D scanning. In the course of the conducted practical research, conclusions were drawn on each method of fixing the place of fire, with the examples given, and their functionality was disclosed, contributing to a high-quality and rapid investigation of the scene. Inefficient aspects of these methods were also identified, requiring special attention and refinement. According to the results of the conducted research, it was proposed to apply all the listed methods of fixing the fire site in a comprehensive manner. Since each of them complements each other in the process of investigating the place of fire, which will help speed up the work of the investigator, as well as help the fire technical expert in answering the questions put to him. This topic of scientific research will never cease to be relevant, because, unfortunately, the number of fires does not decrease in our modern world, and technologies do not stand still. But as practice has shown, the initial methods of fixation are not outdated and bring their benefits, and modern technical equipment helps them in this.

Keywords: fire site inspection protocol, panoramic photography, 3D-scanning, fire site investigation

Введение

Сравнение является одним из универсальных методов научного познания, который позволяет устанавливать сходство и различие изучаемых предметов и явля-

ний реальной действительности. С помощью сравнения можно выявить качественные и количественные характеристики изучаемых объектов, классифицировать, упорядочить и оценить имеющуюся информацию с целью выявления соотношения.

Метод сравнения имеет существенное значение для криминалистики. Благодаря данному методу решается ряд задач, которым соответствуют три взаимосвязанных между собой этапа практической деятельности: аналитический, сравнительный и оценочный [1].

Фиксация осмотра места пожара подразумевает под собой использование экспертом специальных знаний, поскольку неправильное проведение статического осмотра может поставить под вопрос компетентность эксперта, а также существенно повлиять на фиксацию осмотра места происшествия, что, в свою очередь, может привести к необратимым последствиям.

Прежде всего, важными признаками для фиксации места пожара являются те признаки, которые непосредственно могут указывать на расположение очага пожара и причину его возникновения, а также о механизме его распространения и о характере причиненного ущерба [2].

Экспериментальное сравнительное исследование

В качестве объектов сравнительного исследования были выбраны различные способы фиксации вещной обстановки на месте пожара:

- фиксация осмотра с помощью протокола;
- фиксация осмотра с помощью фотосъёмки;
- фиксация осмотра с помощью фотосъёмки на панорамную камеру с углом обзора 180 градусов;
- фиксация осмотра с помощью 3d-сканера.

На практике зачастую приходится сталкиваться с различными протоколами осмотра места пожара с подробным описанием термических повреждений, их описательная часть содержит общую характеристику места пожара, указываются ориентиры места пожара, что уже может дать представление о месте происшествия.

Протокол отражает обстановку, вызванную пожаром, а также степень и характер разрушения конструкций. Благодаря правильному описанию термических повреждений эксперт может сделать предположение по очагу возгорания, его причине и о путях распространения горения.

Встречаются протоколы осмотра, не имеющие подробного описания термических повреждений. Отсутствуют привязки к частям света, что уже, на данном этапе, затрудняет работу эксперта, поскольку нельзя отследить последовательность проведения осмотра. Содержание общих выражений, таких как «все сгорело, будто сгоревшие», что недопустимо при составлении протокола осмотра. Все детали пожара имеют важное значение для эксперта, различные конструкции могут обгореть по-разному и с разной степенью. И все это имеет прямое отношение к установлению причины пожара. Некачественно составленный протокол не дает понятия о пути распространения огня, о наибольших термических повреждениях, на основе этого нельзя сделать выводы об очаге пожара.

Качественное описание термических повреждений способствует успешному разрешению дела. Полученная информация способна помочь эксперту обнаружить место, где пожар возник, а также установить его причину. Протокол как процессуальный документ несет криминалистически важную информацию для эксперта, он дает эксперту «побывать» на месте пожара лично. Некорректно составленный протокол неизбежно приведет к потере значимой для эксперта информации, которую не всегда возможно восстановить. Неполнота обнаруживаемых источников информации о событии, неумение выявить, правильно зафиксировать и использовать в дальнейшем эту информацию приводят к крайне негативным результатам.

Однако, как бы правильно ни был составлен протокол и как бы хорошо ни были там описаны термические повреждения, все это может быть бесполезным в том случае, когда их нельзя прочитать. Протокол осмотра места пожара может быть напечатан или же написан от руки. Во втором случае, т. е. когда написан от руки, протокол осмотра должен быть, прежде всего, читаемым, понятным каждому участнику процесса. Информация, содержащаяся в нем, крайне важна для разрешения дела.

Протокол осмотра места пожара, прежде всего, процессуальный документ, без которого невозможна работа эксперта. Он является первым информационным источником для эксперта, несущим в себе наибольшую криминалистически значимую информацию [3]. Протокол может

быть подробным, с хорошим и полным описанием термических повреждений, но если его невозможно исследовать (прочитать), то вся последующая работа будет бессмысленна. Самый наилучший вариант – составлять все правильно и читаемо, чтобы облегчить работу эксперту и другим участникам процесса.

Перейдем к способу фиксации вещной обстановки на месте пожара при помощи фотосъемки.

Данная программа позволяет соединить несколько фотоснимков, сделанных на месте происшествия, в один панорамный снимок (рис. 1), что, в свою очередь, позволяет наиболее полно и объективно представить общую картину места происшествия, отметить детали, которые могли быть не замечены ранее.



Рис. 1. Панорамные снимки с места происшествия, сделанные в программе PTGui
Fig. 1. Panoramic images from the scene taken in the PTGui program

Прежде всего, по общим правилам фотосъемки места происшествия, необходимо сделать фотоснимки. Важно понимать, что снимки не должны иметь кардинально разные ракурсы, поскольку при соединении их в один они будут отли-

чаться, и общая картина места происшествия не будет ясна, и мы не получим совместимую с реальностью картину места пожара. То есть если мы возьмем два фотоснимка с разных участков осматриваемого объекта, то в этом случае будем лишены полного видения картины места

происшествия, и тогда эти фотоснимки нам придется использовать по отдельности в виде фототаблицы, что, в принципе, тоже может помочь при описании термических повреждений. Однако при правильном составлении панорамного снимка можно определить пути распространения горения, поскольку границы нашего кадра довольно широкие и захватывают большую площадь, то в границах кадра будет видно и окружающее пространство, что значительно облегчит восприятие общей картины для эксперта.

Преимуществами данного способа являются:

- 1) объективность и полнота картины, что дает четкое представление о месте происшествия;
- 2) возможность увидеть детали, которые не были замечены ранее;
- 3) возможность определить пути распространения огня;
- 4) скорость сшивания снимков, поскольку достаточно загрузить их в программу.

У данного способа имеются и недостатки. Один из них – отсутствие русского языка интерфейса программы, что может значительно замедлить работу эксперта. Также одним из недостатков может являться неправильное фотографирование места происшествия, и, как было сказано выше, панорамный снимок нельзя будет составить корректно. Одним из важнейших недостатков является то, что с по-

мощью обычной фотосъемки мы не можем захватить больше вещной обстановки, как, например, это может сделать съемка с помощью фотоаппарата с углом обзора 180° (рис. 2).

Данный способ хорош тем, что фотографирование на фотоаппарат с углом обзора 180° позволяет составить панораму с последующим созданием 3D-туров. Такая камера позволяет заменить несколько фиксированных фотографий, поскольку она обеспечивает обзор всей территории при меньшем количестве слепых зон. Чем больше угол обзора камеры – тем большее пространство она позволяет просматривать. Это является преимуществом, поскольку таким образом можно полностью запечатлеть вещную обстановку в ее первоначальном виде, что будет полезно не только эксперту, но и при дальнейшем рассмотрении дела в суде, которое поможет участникам судебного процесса побывать на месте происшествия с помощью 3D-тура. Помимо этого, данным способом фиксации мы сокращаем время фотофиксации места происшествия в рамках проведения осмотра места пожара, а также исключаем возможность упустить важные объекты. Если же требуется наиболее детальное и высокое качество изображения (например, при низком освещении), то можно увеличить количество производимых снимков [7, 9, 10].



Рис. 2. Сферическая проекция места пожара

Fig. 2. Spherical projection of the fire site

Преимущества данного пособия фиксации:

- 1) возможность виртуального перемещения по местности;
- 2) изменение времени – сравнение нескольких снятых материалов в разных временных промежутках, которые соответствуют фактической съемке;
- 3) возможность детального увеличения объекта;
- 4) сокращение времени фиксации осмотра места происшествия.

Безусловно, данный способ фиксации имеет и свои недостатки. Одним из них является необходимое наличие определенного программного обеспечения, доступ к которому может быть затруднителен в связи с коммерческой составляющей. В данном случае требуется разработка отечественного программного обеспечения. Также один из недостатков в том, что «сшитые» фотоснимки могут являться препятствием для признания указанных панорам допустимыми доказательствами. Для избежания последующих возможных

сомнений в том, что фотографии не были изменены на этапе обработки исходных фотоснимков, следует принять ряд мер, которые будут обеспечивать допустимость данных доказательств:

- 1) при проведении осмотра необходимо указать марку и модель фотоаппарата, а также его объектив;
- 2) необходимо обеспечить надлежащую упаковку носителей цифровой информации в соответствии с процессуальными требованиями;
- 3) необходимо обеспечить участие понятых либо применить видеосъемку на этапе создания компьютерной сферической панорамы (это позволит подтвердить достоверность отображения окружающей обстановки и соответствие итогового изображения исходным кадрам).

Все же главным минусом создания 3D-туров является несоблюдение реальных параметров вещной обстановки по краям изображения. Они представлены в более выпуклом восприятии, что не поз-

воляет оценить реальные параметры объектов, а для эксперта это играет огромную роль для ответа на поставленные перед ним вопросы.

Перейдем к заключительному способу фиксации вещной обстановки на месте пожара. А именно фиксации с помощью 3D-сканера. Безусловно, вы знакомы с тем, что 3D-сканер позволяет измерить объекты со сложной геометрией и преобразовать полученные сведения в облако точек. Работа 3D-сканера позволяет построить модель, которую можно модернизировать, а именно вносить изменения в структуру, экспериментировать с формой и т. д. [5, 6, 10].

В данном способе фиксации использовался лазерный 3D-сканер FARO Focus 3D X130.

Преимущества данного способа:

1) в технологии реализован принцип дистанционного зондирования, что позволяет собирать информацию об исследуемом объекте, находясь на расстоянии от него, что дает зафиксировать место пожара даже тогда, когда пожар еще не потушен;

2) скорость сканирования, что позволяет оптимизировать осмотр места пожара;

3) позволяет сканировать большую площадь места происшествия;

4) получаемые 3D-модели можно передвигать, масштабировать, вращать и представлять в судебном порядке;

5) 3D-сканирование позволяет сохранить полное геометрическое соответствие форм и размеров реального объекта, что не свойственно при сферической фотосъемке.

К недостаткам данного метода можно отнести:

1) невозможность распознавания мест, где имеются отложения копоти, и нельзя отличить копоть от неосвещенных мест, что затрудняет эксперту установить пути распространения горения;

2) невозможно просканировать объекты, которые не имеют объема [8];

3) дорогостоящее оборудование;

4) требуется использование определенного программного обеспечения, которое на данный момент имеется только в иностранной версии с истекшей лицензией, а получить новую лицензию, в связи с введением санкций иностранными производителями, сложно. В связи с этим возникает вопрос о создании отечественного продукта для данного дорогостоящего оборудования.

Результаты сравнительного исследования

Исходя из всех вышеперечисленных методов, была предложена комплексная методика по применению этих методов, схема взаимосвязи способов фиксации вещной обстановки на месте пожара (рис. 3).

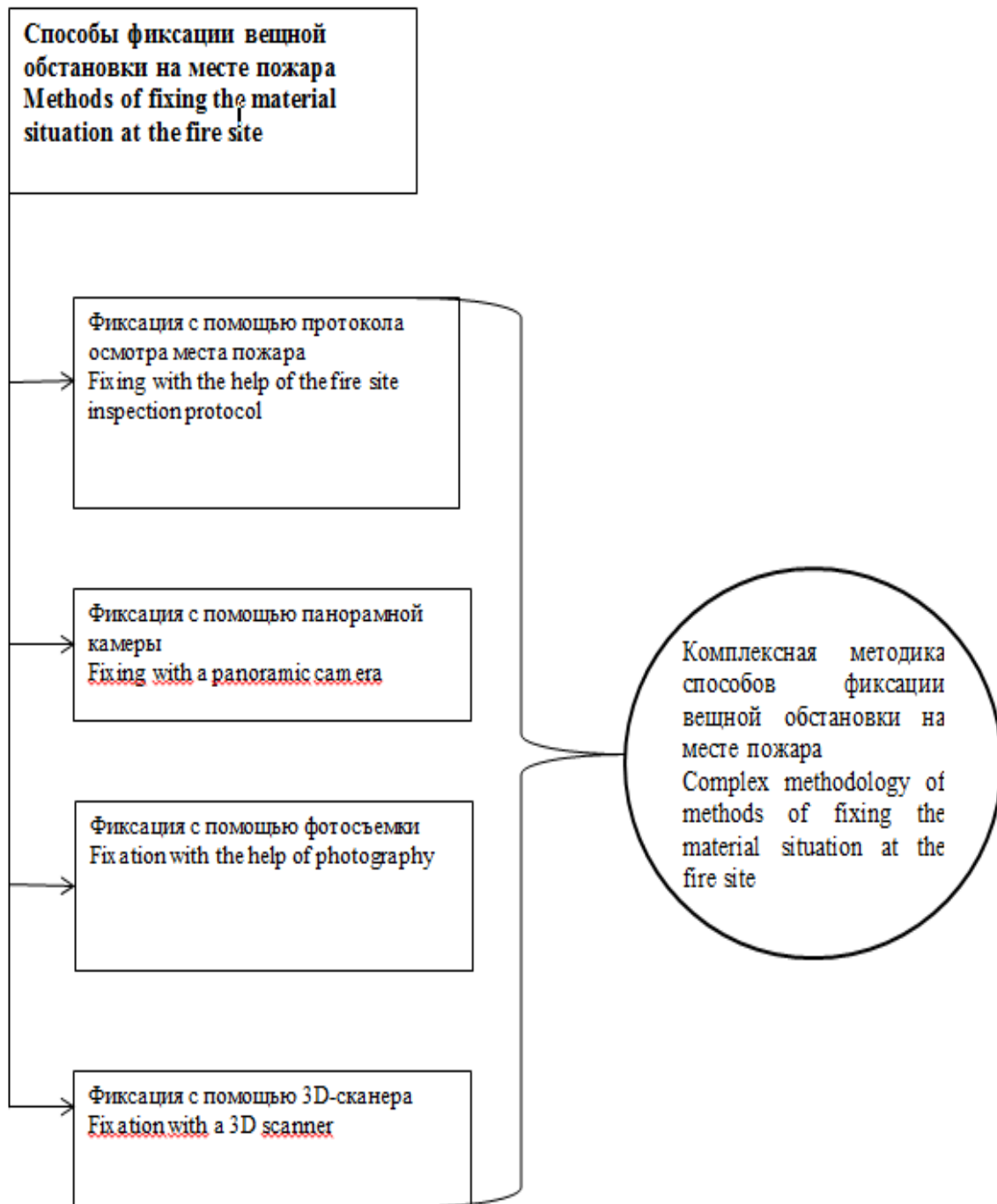


Рис. 3. Схема взаимосвязи способов фиксации вещной обстановки на месте пожара
Fig. 3. Diagram of the relationship of methods of fixing the material situation at the fire site

Рассмотрев каждый из способов, изучив преимущества и недостатки каждого способа, было выяснено, что в совокупности эти методы хорошо дополняют друг друга и позволяют пожарно-техническому эксперту представить полное понимание общей картины места пожара, что

положительно скажется на сделанных им выводах.

Безусловно, каждый метод может использоваться по отдельности, но наибольшая эффективность будет достигнута путем создания комплексного подхода. Однако для того чтобы данный комплекс работал, необходимо полностью

укомплектовать техническим оснащением все исследовательские пожарные лаборатории по Российской Федерации.

Использование данного комплексного подхода значительно упростило бы жизнь рядовым специалистам в области пожарной безопасности. Он поможет добиться точности как в расчетах, так и в исследованиях.

Заключение

В заключении хочется отметить, что данные способы фиксации вещной обстановки на месте пожара имеют широкую область применения для решения различных пожарно-технических задач. Обладая знаниями о каждом способе фиксации вещной обстановки и имея достаточные данные о преимуществах и недостатках каждого из способов, работа специалиста в области пожарной безопасности будет значительно упрощена.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдурегимова Т. И., Трущенко И. В. Некоторые аспекты осмотра, обыска и выемки в целях обнаружения, фиксации и изъятия объектов для производства судебной компьютерной экспертизы // Теория и практика судебной экспертизы: международный опыт, проблемы, перспективы : сб. науч. тр. I Междунар. форума. М., 2017. С. 27–33.
 2. Сысоева Т. П., Кухарев А. А. Особенности формирования признаков очага пожара при низких температурах // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в арктическом регионе : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2020. С. 232–233.
 3. Внук В. И. Фотографическая и видеofиксация на местах происшествий при взрывах и пожарах // Успехи современной науки. 2016. Т. 6, № 11. С. 84–86.
 4. Антонов А. О., Зезюля И. М. Детальная фиксация объектов, изымаемых с мест пожаров, с применением оборудования для бестеневого фотосъемки // Расследование пожаров: сборник статей. СПб, 2016. С. 103–107.
 5. Гуцев М. Е., Родионова Ю. В. Доказательственное значение компьютерной сферической фотопанорамы // Российский следователь. 2014. № 20. С. 48.
 6. Середович В. А. Наземное лазерное сканирование: монография. Новосибирск, 2009. 261 с.
 7. Сысоева Т. П., Лобова С. Ф., Латышев О. М. Применение 3d-сканера при осмотре места пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 4 (60). С. 75–79.
 8. Spatial models developed using laser scanning at gas condensate fields in the northern construction-climatic zone/ S.N. Men'shikov, A.A. Dzhahjabov, G.G. Vasiliev, I.A. Leonovich, O.M. Ermilov// Journal of Mining Institute. 2019. T. 238. C. 430-437.
 9. A triangulation sensor for measuring the displacements and high-precision monitoring of the production performance/ V. A. Stepanov, E. N. Moos, M. V. Shadrin, V. N. Savin, A. V. Umnyashkin, N. V. Umnyashkin // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2020. T. 13, № 1. C. 54–65.
- Creating a three-dimensional model using laser scanning / Zh. M. Aukazhiyeva, B. E. Mussagaliyeva // Евразийский союз ученых. 2020. № 10–7 (79). С. 12–19.

REFERENCES

1. Abduragimova T. I., Trushchenkov I. V. Some aspects of inspection, search and seizure in order to detect, fix and seize objects for forensic computer examination. Theory and practice of forensic examination: international experience, problems, prospects. Collection of scientific papers and the International Forum. Moscow, 2017; 27–33 (rus).
2. Sysoeva T.P., Kukharev A.A. Features of the formation of signs of a fire at low temperatures //In the collection: security service in Russia: experience, problems, prospects. The Arctic is a region of strategic interests: legal policy and modern security technologies in the Arctic region. Materials of the international scientific and practical conference. St. Petersburg, 2020; 232–233. (rus)
3. Vnukov V.I. Photographic and video recording at the scene of explosions and fires. The successes of modern science. 2016; 6(11):84–86. (rus)
4. Antonov A.O., Zezyulya I.M. Detailed fixation of objects seized from fire sites using equipment for shadowless photography. In the collection: investigation of fires. Collection of articles. Saint Petersburg, 2016; 103–107. (rus).

5. Gushchev M. E., Rodionova Yu. V. The evidentiary value of a computer spherical photopanorama. A Russian investigator. 2014; 20:48. (rus).
6. Seredovich V.A. Ground laser scanning: monograph. Novosibirsk: SGGa, 2009; 261. (rus).
7. Sysoeva T.P., Lobova S.Sh., Latyshev O.M. 3d scanner image when viewing the shooting location. Problems of risk management in the technosphere. 2021; 4(60):75–79. (rus).
8. Menshikov S.N., Jaljabov A.A., Vasiliev G.G., Leonovich I.A., Ermilov O.M.. Spatial models developed using laser scanning at gas condensate fields in the northern construction and climatic zone. Journal of the Mining Institute. 2019; 238: 430–437. (rus).
9. Stepanov V.A., Moos E.N., Shadrin M.V., Savin V.N., Umnyashkin A.V., Umnyashkin N.V. Triangulation sensor for measuring movements and high-precision control of production indicators. Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and mathematics. 2020; 13(1):54–65. (rus).
10. Aucazhieva Zh.M., Musagalieva B.E. Creation of a three-dimensional model using laser scanning. Eurasian Union of Scientists. 2020; 10-7(79):12–19. (rus).

Информация об авторах

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

Лобова Софья Федоровна, старший научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров, Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; e-mail: sophyf@mail.ru

Мусяенко Тамара Викторовна, доктор политических наук, доцент, профессор кафедры управления и экономики, Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9658-1169): 0000-0001-9658-1169; ResearcherID:S-1202-2016; SPIN-код: 2319-0146, AuthorID: 390246.

Кухарев Александр Александрович, заместитель начальника отдела экспертизы пожаров и организации подготовки экспе-

Information about the authors

Tatiana P. Sysoeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Center for Fire Expertise, St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; PRINCE ID: 3683-2066; Scopus Author ID: 57216502671; ResearcherID:AEE-9733-2022; ORCID:0000-0003-0230-465; e-mail: syisik@mail.ru

Sofya F. Lobova, Senior Researcher at the Research Center for Fire Expertise, St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: sophyf@mail.ru

Tamara V. Musienko, Doctor of Political Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Management and Economics, St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9658-1169; Researcher ID: S-1202-2016; SPIN-code: 2319-0146, Author ID: 390246

Alexander A. Kukharev, Deputy Head of the Department of Fire Expertise and Organization of Expert Training of the

ртов исследовательского центра экспертизы пожаров, Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; РИНЦ ID: 6980-7904; ORCID:0000-0002-0338-1254;
e-mail: kukharev@mail.ru

Research Center for Fire Expertise, St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; User identification number: 6980-7904; ORCID: 0000-0002-0338-1254;
e-mail: kukharev@mail.ru

УДК 614.841

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Беззапонная Оксана Владимировна, Злобина Снежана Вадимовна,
Динисламов Марат Минирафитович, Выгузова Евгения Вячеславна

¹Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования полимерных материалов различной химической природы (древесина, полиэтилен, поливинилхлорид и пенополиуретан) методом синхронного термического анализа. Высокая информативность метода, позволяющего за одно испытание определить как минимум три показателя пожарной опасности, и высокая точность метода (погрешность не превышает 3 %) свидетельствуют о преимуществе метода синхронного термического анализа по сравнению с применяемыми в настоящее время стандартными методами определения показателей пожарной опасности веществ и материалов.

Рассмотрена методология определения таких показателей пожарной опасности, как температура воспламенения, температура самовоспламенения и теплота сгорания. В результате исследований установлено, что температуру воспламенения целесообразно определять по началу пика на дифференциальной термогравиметрической кривой, характеризующего процесс термоокислительной деструкции (горения) исследуемого материала. Температуру самовоспламенения определяли по температуре максимума первой производной кривой дифференциальной сканирующей калориметрии термоокислительной деструкции (горения) материала. Теплоту сгорания в среде воздуха определяли по интегральной интенсивности ДСК сигнала в температурном интервале термоокислительной деструкции исследуемых полимеров.

Анализ результатов исследований и сравнение их с данными из справочных и литературных источников свидетельствуют о возможности применения метода синхронного термического анализа для определения показателей пожарной опасности полимерных материалов.

Ключевые слова: термоокислительная деструкция полимеров, температура воспламенения, температура самовоспламенения, теплота сгорания, пожарно-техническая экспертиза

STUDY OF THE FIRE HAZARDOUS PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

Oksana V. Bezzaponnaya, Snezhana V. Zlobina,
Marat M. Dinislamov, Evgenia V. Vyguzova

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

ABSTRACT

The article presents the results of a study of polymeric materials of various chemical nature (wood, polyethylene, polyvinyl chloride and polyurethane foam) by the method of synchronous thermal analysis. The high information content of the method, which makes it possible to determine at least three fire hazard indicators in one test, and the high accuracy of the method (the error does not exceed 3%) indicate the advantage of the synchronous thermal analysis method compared to the currently used standard methods for determining the fire hazard indicators of substances and materials.

The methodology for determining such indicators of fire hazard as the ignition temperature, autoignition temperature and combustion calorific value is considered. As a result of the research, it was found that it is advisable to determine the ignition temperature by the beginning of the peak on the differential thermogravimetric curve, which characterizes the process of thermo-oxidative destruction (combustion) of the material under study. The autoignition temperature was determined from the temperature of the maximum of the first derivative of the differential scanning calorimetry curve of the thermal-oxidative degradation (combustion) of the material. The heat of combustion in air was determined from the integral intensity of the DSC signal in the temperature range of thermal-oxidative degradation of the polymers under study. The analysis of the research results and their comparison with data from reference and literature sources indicates the possibility of using the method of synchronous thermal analysis to determine the fire hazard indicators of polymeric materials.

Keywords: thermal-oxidative destruction, ignition temperature, self-ignition temperature, combustion calorific value, fire-technical expertise

Введение

Известно, что возникновение и развитие пожара во многом определяются химической природой горючей нагрузки – горючих веществ и материалов, расположенных в помещении или на открытых площадках, а пожароопасные свойства веществ и материалов характеризуются значениями показателей их пожарной опасности. Для определения показателей пожарной опасности веществ и материалов в настоящее время в пожарно-технических исследованиях применяются методы стандартных испытаний в соответствии с ГОСТ 12.1.044–2018 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Каждый из применяемых стандартных методов испытаний позволяет определить

один показатель пожарной опасности вещества (материала). Многие из применяемых методов трудоемки, требуют продолжительного времени для их проведения, а также характеризуются низкой сходимостью и воспроизводимостью получаемых результатов испытаний и, как следствие, – высокой погрешностью (более 5 %, а зачастую и более 10 %), что недопустимо, особенно при проведении экспертных исследований при производстве пожарно-технической экспертизы.

Для оценки пожароопасных свойств различных веществ и материалов (характеристик процесса их термоокислительной деструкции) целесообразно применять метод синхронного термического анализа (СТА), что до настоящего времени практиковалось нечасто [1–3]. Применение метода СТА для решения данной задачи имеет ряд преимуществ перед другими

методами испытаний: метод СТА позволяет определить за одно испытание сразу несколько пожароопасных характеристик исследуемого материала; применение современного программного обеспечения позволяет быстро и качественно обрабатывать полученные результаты; метод характеризуется высокой сходимостью и точностью полученных результатов (погрешность не превышает 3 %). Также можно отметить высокий уровень автоматизации в управлении экспериментом и возможность накопления данных с последующим созданием банка данных информационной системы.

Несмотря на наличие достаточного объема преимуществ, метод СТА в недостаточной мере разработан: отсутствуют методики, позволяющие экспертам решать диагностические задачи при непосредственном производстве пожарно-технических экспертиз, в частности при оценке пожароопасных свойств материалов вещной обстановки пожара. В связи с этим разработка методологии оценки пожароопасных свойств материалов различной химической природы высокоточным и информативным методом СТА является актуальной задачей исследований. Безусловно, материалы различной химической природы характеризуются индивидуальными особенностями протекания процесса их термоокислительной деструкции, но общие принципы проведения испытаний материалов методом СТА и интерпретации результатов – едины.

Разработанные и действующие в настоящее время стандарты ASTM и ГОСТы для термического анализа регламентируют основные принципы проведения испытаний полимерных материалов, определение методами термического анализа таких характеристик, как температура плавления, температура кристаллизации, температура стеклования, потеря массы, теплоты плавления и кристаллизации, ки-

нетических параметров. При этом отсутствуют методики определения таких важных показателей пожарной опасности, как температура воспламенения, температура самовоспламенения, кислородный индекс, теплота горения, температура тления и другие.

В настоящее время накоплен уже значительный экспериментальный материал исследования данным методом процесса термоокислительной деструкции различных материалов [1–12], что весьма ценно как при проведении экспертизы пожаров, так и для научно-методологических разработок. В литературных источниках [2, 4, 6] рассмотрены различные подходы к определению термоаналитических параметров, характеризующих пожароопасные свойства веществ и материалов. В работах [5, 6, 8, 9, 12] рассмотрены примеры применения методов ТА для решения различных задач пожарно-технической экспертизы. Рассмотрим возможности метода СТА для определения таких важных показателей пожарной опасности как температура воспламенения, температура самовоспламенения и теплота сгорания полимерных материалов, которые в большей степени составляют горючую нагрузку в современных жилых зданиях и характеризуются высокой пожарной опасностью.

Материалы и методы

Объектами исследований выбраны твердые полимерные материалы природного и синтетического происхождения различной химической природы: древесина – один из самых распространенных строительных материалов; пенополиуретан (ППУ) или поролон, применяемый для набивки мягкой мебели; полиэтилен (ПЭ), из которого изготавливают трубы, поливинилхлорид, применяемый при производстве линолеума и изоляции электропроводки.

Исследования проводили методом синхронного термического анализа на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter (рис. 1), прошедшего предварительно поверку.

Для испытаний готовились образцы полимерных материалов массой 6–7 мг. Испытания образцов полимерных материалов проводились при следующих условиях:



Рис. 1. Прибор синхронного термического анализа Netzsch STA 449 F5 Jupiter®
Fig. 1. Synchronous thermal analysis instrument Netzsch STA 449 F5 Jupiter®

– исходная температура: 25°C;
– конечная температура: 900°C;
– скорость нагрева: 20°C/мин;
– среда: воздух (20 % кислорода и 80 % азота);
– расход продувочного газа: 75 мл/мин;
– материал тигля: корунд (Al₂O₃).

При проведении испытаний фиксировались следующие термоаналитические зависимости: термогравиметрическая (ТГ) кривая; дифференциальная термогра-

виметрическая (ДТГ) кривая; дифференциально-сканирующая калориметрическая (ДСК) кривая.

Результаты исследований и их обсуждение

Термограмма древесины сосны в окислительной среде воздуха представлена на рис. 2.

На представленной термограмме по ТГ кривой наблюдается значительная потеря массы в интервале температур 240–530°C. Начало разложения материала обычно фиксируют по резкому снижению массы на ТГ кривой (по точке пересечения касательной, проведенной в точке

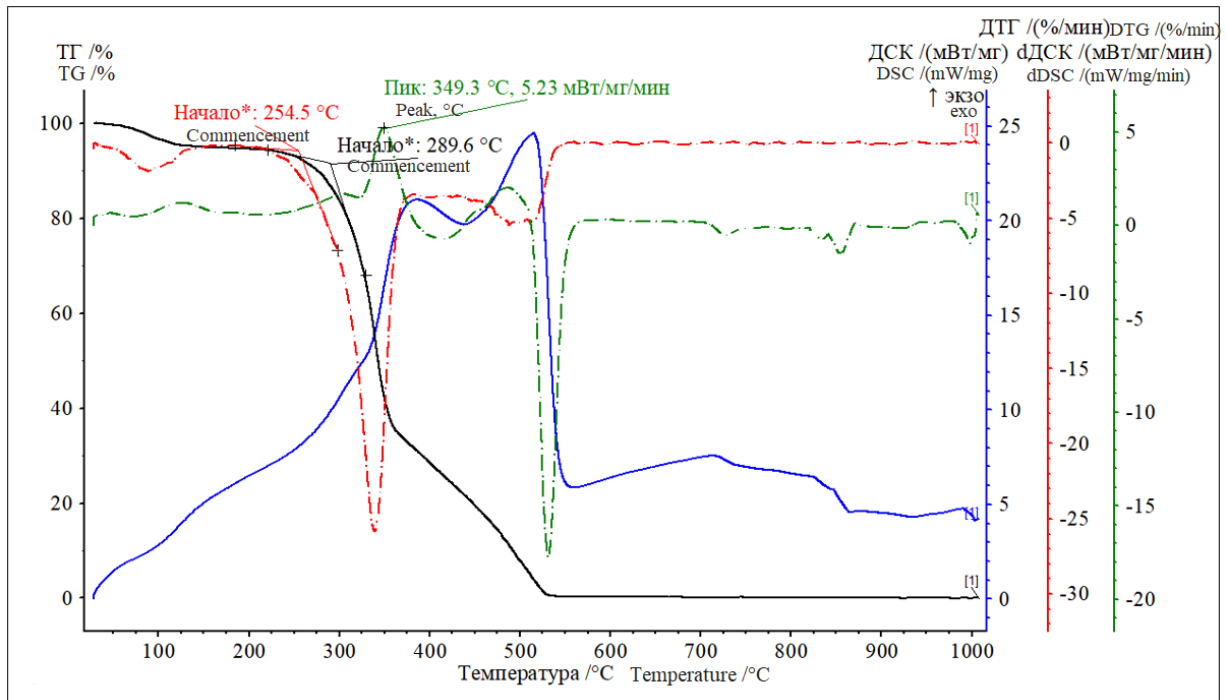


Рис. 2. Термограмма древесины сосны в окислительной среде воздуха

Fig. 2. Thermogram of pine wood in an oxidizing air environment

перегиба, характеризующей степень разложения, с горизонтальной нулевой линией на кривой ТГ). Данную температуру принимают за температуру воспламенения материала при условии наличия тепловыделения в рассматриваемом температурном интервале за счет термоокислительной деструкции материала. В случае древесины сосны эта температура составила 289,6°C. В соответствии с [13] температура воспламенения древесины сосны составляет 250°C. По мнению авторов статьи, ДТГ кривая (кривая первой производной ТГ кривой) более чувствительна к изменению массы и точнее фиксирует даже малейшие изменения, происходящие с испытуемым образцом материала при воздействии на него высоких температур, то есть обеспечивает объективное определение температуры начала разложения исследуемого материала. Анализ ДТГ кривой показал, что разложение древесины с выделением горючих и негорючих газов начинается уже при температуре 254,5°C (температуре начала пика на ДТГ

кривой). Сопоставление результатов термического анализа и результатов испытаний, представленных в справочной литературе [13], полученных стандартными методами, подтверждает гипотезу, что за температуру воспламенения целесообразно принимать температуру начала интенсивности потери массы на ДТГ кривой. Полученное значение температуры воспламенения древесины сосны составило 254,5 °С, что удовлетворительно согласуется со справочными данными [13], полученными стандартным методом.

Рассмотрим определение методом СТА такого важного показателя пожарной опасности веществ и материалов, как температура самовоспламенения. В литературных источниках [2] за температуру самовоспламенения исследуемых материалов принимают точку перегиба экзотермического пика на ДСК кривой, которую определяют с помощью проведения касательных к базовой линии и к стороне ДСК пика и нахождения середины отрезка, соединяющего точки пересечения касательных. Современное программное обеспечение

метода СТА (Proteus Thermal Analysis) позволяет более точно определить точку перегиба на ДСК кривой с использованием приема дифференцирования ДСК кривой. При этом температура самовоспламенения соответствует температуре максимума на кривой dДСК (производной ДСК сигнала). Прием дифференцирования кривой ДСК сигнала позволяет определить экстремум на кривой, характеризующий изменение теплового потока при исследовании самоподдерживающегося экзотермического процесса. Для древесины сосны температура самовоспламенения составила 349,3°C, что также удовлетворительно согласуется с данными из справочной литературы [13].

Теплоту сгорания древесины берёзы определяли по площади экзотермического пика на ДСК кривой. Учитывая, что данный экзотермический эффект отсутствует на ДСК кривой при испытаниях в инертной среде, можно утверждать, что

данный экзотермический эффект обусловлен именно процессом термоокислительной деструкции материала или горением. Теплота сгорания древесины сосны составила 11 177,0 Дж/г. Величина теплового эффекта выше 2000 Дж/г, что свидетельствует о достаточно высокой горючести исследуемого материала.

Аналогичным образом определялись значения показателей пожарной опасности синтетических полимеров: полиэтилена (ПЭ) высокого давления, характеризующегося высокой степенью кристалличности, поливинилхлорида (ПВХ) и пенополиуретана (ППУ). Термограммы полимеров, полученные в атмосфере воздуха при скорости нагрева 20°C/мин, представлены на рис. 3–5, а результаты, полученные после обработки термоаналитических кривых с помощью программного обеспечения Proteus Thermal Analysis, представлены в таблице 1.

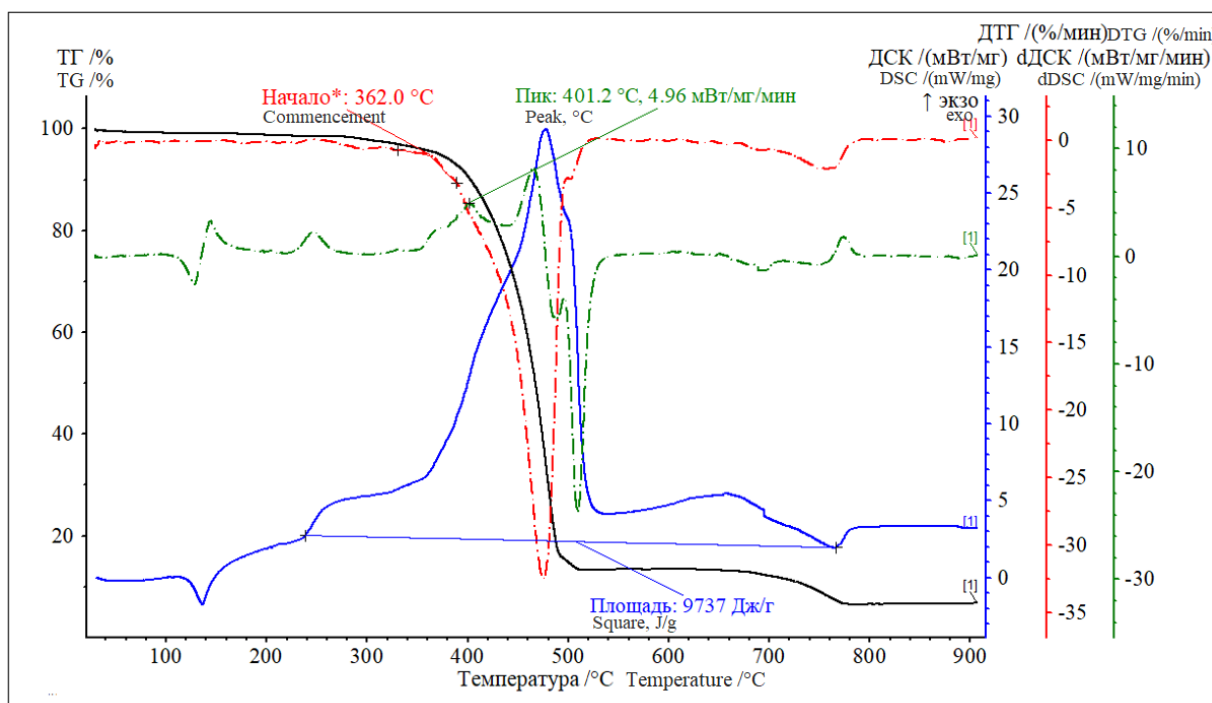


Рис. 3. Термограмма полиэтилена в окислительной среде воздуха

Fig. 3. Thermogram of polyethylene in an oxidizing air environment

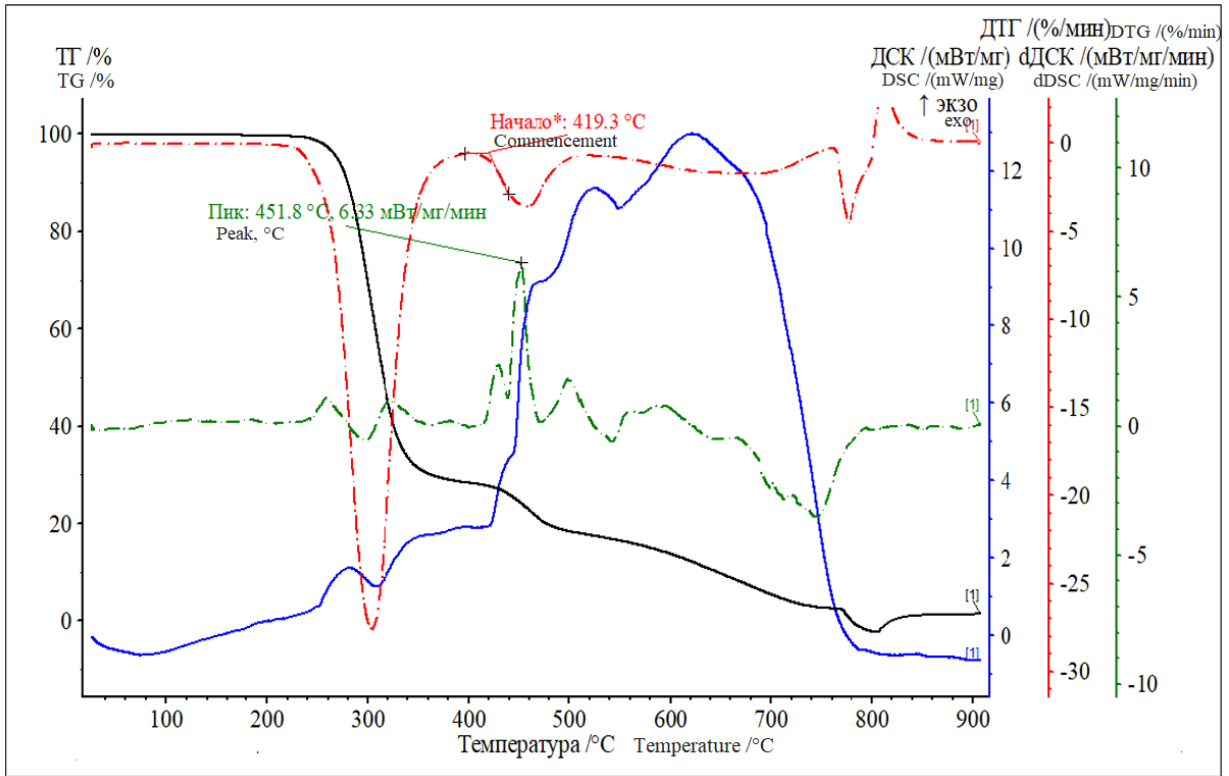


Рис. 4. Термограмма ПВХ в окислительной среде воздуха

Fig. 4. Thermogram of PVC in an oxidizing air environment

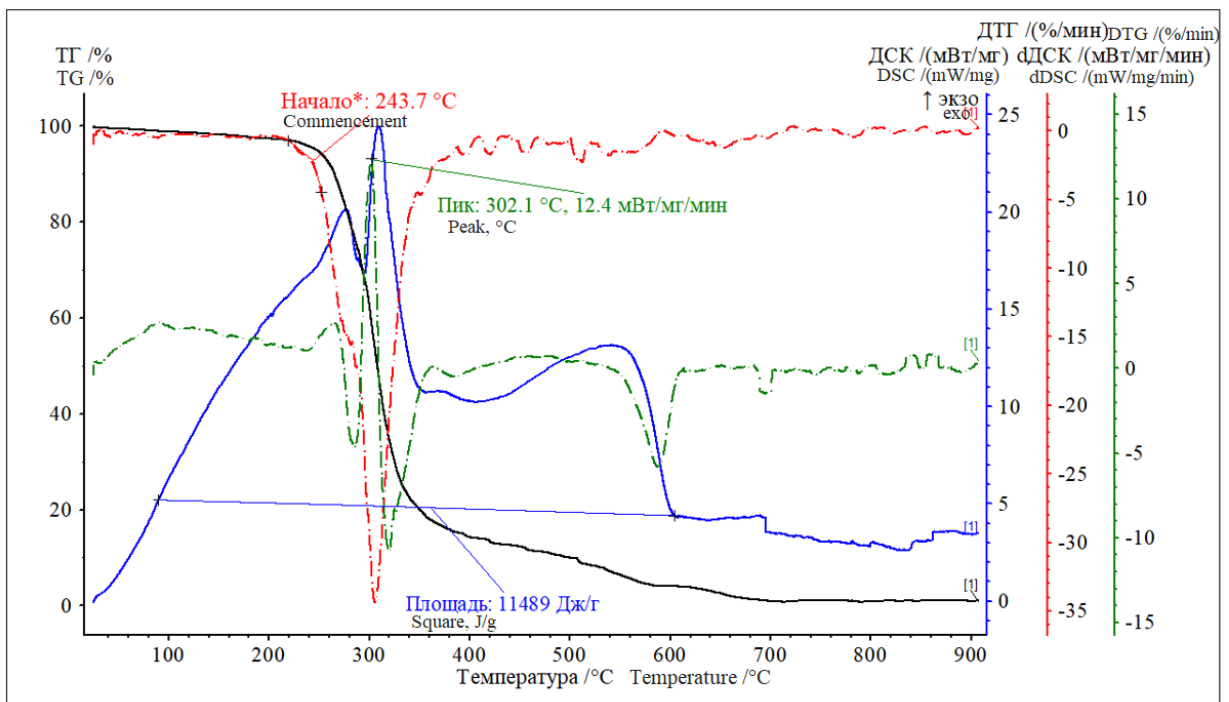


Рис. 5. Термограмма ППУ в окислительной среде воздуха

Fig. 5. PPU thermogram in an oxidizing air environment

Таблица 1.

Показатели пожарной опасности исследуемых полимерных материалов

Table 1.
Fire hazard indicators of the investigated polymeric materials

Исследуемый материал Material under study According to	Температура воспламенения, T_b , °C Ignition temperature, T_{ign} , °C		Температура самовоспламенения, $T_{свп}$, °C Autoignition temperature, T_{autign} , °C		Теплота сгорания в среде воздуха, Q , Дж/г The heat of combustion in air, Q , J/g	
	Эксперимент Experiment	По данным [13–15] According to [13–15]	Эксперимент Experiment	По данным [13–15] According to [13–15]	Эксперимент Experiment	По данным лит. ист According to [13–15]
Древесина сосны Pine wood	254,5	230–260	349,3	350–390	11 177	–
Полиэтилен Polyethylene	362,0	341–357	401,2	349–417	9 737	–
Поливинилхлорид PVC	419,3	355–391	451,8	440–454	8 595	–
Пенополиуретан PPU	243,7	225	302,1	390–450	11 489	–

Можно заметить, что в таблице не приведена теплота сгорания полимерных материалов из литературных источников. Это обусловлено тем, что определение теплоты сгорания проводится методом калориметрической кислородной бомбы в атмосфере чистого кислорода, в отличие от результатов исследований методом СТА, где теплота сгорания определялась в атмосфере воздуха, что наиболее приближено к реальным условиям пожара. Естественно, что значения теплоты сгорания, полученные в атмосфере кислорода, значительно выше, чем в атмосфере воздуха, и проводить сравнение этих значений не корректно. Также надо отметить широкий диапазон разброса значений температуры воспламенения и температуры самовоспламенения из литературных источников [13–15]. Причина столь широкого расхождения результатов обусловлена не только низкой воспроизводимостью результатов исследований, но и чистотой исследуемых полимерных

материалов, так как очень часто производители полимеров используют различные добавки и стабилизаторы, улучшающие эксплуатационные свойства полимеров, что и приводит к расхождениям в результатах испытаний. Ввиду очень широкого разброса данных из литературных источников оценить степень расхождения результатов исследований методом СТА и данных из литературных источников не представляется возможным.

Анализ полученных показателей пожарной опасности исследуемых материалов свидетельствует об их высокой пожарной опасности. По всем показателям наибольшей пожарной опасностью характеризуются ППУ и древесина. С учетом способности исследуемых термопластичных полимеров (ПЭ, ПВХ, ППУ) при воздействии высоких температур плавиться, растекаться, гореть и капать с формированием вторичных очагов пожара, а также выделять большое количество токсичных газов, пожарная опасность данных материалов еще более возрастает.

Выводы

Анализ полученных результатов и сравнение их со значениями, приводимыми в литературных источниках, позволил прийти к выводу:

– температуру воспламенения целесообразно определять по началу ДТГ пика, характеризующего процесс термоокислительной деструкции (горения) исследуемого материала;

– температуру самовоспламенения – по температуре максимума dДСК кривой термоокислительной деструкции (горения) материала;

– теплоту сгорания в среде воздуха – по интегральной интенсивности ДСК сигнала в температурном интервале термоокислительной деструкции исследуемого материала.

Полученные значения показателей пожарной опасности неплохо согласуются с данными из литературных источников, однако ввиду очень широкого разброса данных из литературных источников, оценить степень расхождения результатов исследований методом СТА и данных из литературных источников не представлялось возможным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов Н. В. Прогнозирование пожарной опасности строительных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002. 39 с.
2. Мироньев А. В. Исследование пожарной опасности строительных материалов с помощью методов термического анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2007. 22 с.
3. Молчадский О. И. Прогноз пожарной опасности строительных материалов при использовании методов термического анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 22 с.
4. Исследование пожарной опасности древесины различных пород методами термического анализа / О. В. Беззапонная и др. // Техносферная безопасность. 2021. № 3 (32). С. 43–50.
5. Применение термического анализа при исследовании и экспертизе пожаров: методическое пособие / Е. Д. Андреева и др. М., 2012. 60 с.
6. Беззапонная О. В., Лузина М. Д., Динисламов М. М. Применение метода синхронного термического анализа для оценки горючести веществ и материалов // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 127–140.
7. Fateh, T., Richard, F., Rogaume, T., Joseph, P. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 120. 2016. P. 423-433. doi.org/10.1016/j.jaap.2016.06.014
8. Чешко И. Д., Принцева М. Ю., Лобанова О. В. Инструментальные методы в современной пожарно-технической экспертизе // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2020. № 4. С. 29–41.
9. Беззапонная О. В., Хабибова К. И. Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертизы // Техносферная безопасность. 2022. № 1 (34). С. 85–91.
10. D. Hohenwarter, H. Mattausch, C. Fischer, M. Berge, B. Haar Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their Improvement Using Various Flame Retardants // *Materials* 2020, 13, 5756; doi:10.3390/ma13245756;
11. Представительство NETZSCH-GERAETEBAU GMBH в России. Применение методов термического анализа для прогнозирования с помощью специализированного программного обеспечения // Пластические массы. 2010. № 2. С. 2–6.
12. Беззапонная О. В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // *Пожаровзрывобезопасность*. 2022. Т. 31, № 5. С. 26–32.
13. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник в 2 ч. М., 2004. Ч. 1. 713 с; Ч. 2. 774 с.
14. Абдулалиев Ф.А., Лебедев А.Ю., Цанг Д.А. Исследование пожарной опасности полимерных композиционных материалов // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева*. 2015. №2. С. 38-48.

15. Q&As Concerning Fire of Flexible Polyurethane Foams: Hazards and Prevention «For Houses and Buildings» : Translation into English by JUII Technology and Safety Committee Fire Safety Working Group 2010 Japan Urethane Industries Institute May 2010 – 35 p.

REFERENCES

1. Smirnov N.V. Forecasting the fire hazard of building materials: Abstract of the thesis. ... doctor of tech. Sciences: 05.26.03 «Fire and industrial safety» (construction) / Vseros. scientific research in-t fire prevention. Defense Ministry of Internal Affairs of Russia. Moscow, 2002; 39. (rus).
2. Mironchev A.V. Investigation of the fire hazard of building materials using thermal analysis methods: Ph.D. dis. ... cand. those. Sciences: 05.26.03 / Mironchev Alexey Vladimirovich. St. Petersburg, 2007; 22. (rus).
3. Molchadsky O.I. Forecast of the fire hazard of building materials when using thermal analysis methods: Abstract of the thesis. ... candidate of technical sciences: 05.26.03 / Vseros. scientific research in-t fire prevention. Defense Ministry of Internal Affairs of Russia. Moscow, 2001; 22. (rus).
4. Bezzaponnaya O.V., Krasilnikova M.A., Evseenkova A.S., Glukhikh P.A., Makarkin S.V. Investigation of the fire hazard of wood of various breeds using thermal analysis methods. *Technosphere safety*. 2021; 3(32):43–50. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46710992> (rus).
5. Andreeva E.D., Princeva M.Yu., Kondratiev S.A., Cheshko I.D. The use of thermal analysis in the study and examination of fires: Methodological guide. Moscow, VNIPO, 2012; 60. (rus).
6. Bezzaponnaya O.V., Luzina M.D., Dinislamov M.M. Application of the method of synchronous thermal analysis to assess the combustibility of substances and materials. *Technosphere safety*. 2022; 4(37):127–140. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50105539> (rus).
7. Fateh T., Richard F., Rogaume T., Joseph P. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 120. 2016; 423–433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.06.014>
8. Cheshko I. D., Printseva M. Yu., Lobanova O. V. Instrumental methods in modern fire-technical expertise. Supervisory activity and forensic expertise in the security system. 2020; 4:29–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430192> (rus).
9. Bezzaponnaya O.V., Khabibova K.I. Application of the thermal analysis method in the identification of thermoplastics and thermosets in the framework of fire-technical expertise // *Technosphere safety*. 2022; 1(34): 85–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48167930> (rus).
10. Hohenwarter D., Mattausch H., Fischer C., Berge M., Haar B. Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their Improvement Using Various Flame Retardants. *Materials*. 2020; 13:5756; URL: DOI: 10.3390/ma13245756
11. Representative office of NETZSCH-GERAETEBAU GMBH in Russia. Application of thermal analysis methods for forecasting using specialized software. *Plastic masses*. 2010; 2:2–6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13077944> (rus).
12. Bezzaponnaya O.V. Study of fire development features using the method of synchronous thermal analysis. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):26–32. URL: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32> (rus).
13. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them. Reference book: in 2 parts. Moscow, Ass «Pozhnauka», 2004. (rus).
14. Abdulaliev F.A., Lebedev A.Yu., Tsang D.A. Study of the fire hazard of polymer composite materials. *Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after. Hero of the Russian Federation General of the Army E.N. Zinichev*. 2015; 2:38–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ugydz> (rus).
15. Q&As Concerning Fire of Flexible Polyurethane Foams: Hazards and Prevention «For Houses and Buildings»: Translation into English by JUII Technology and Safety Committee Fire Safety Working Group 2010 Japan Urethane Industries Institute. May 2010; 35. URL: <http://www.urethane-jp.org/topics/doc/QA>

Информация об авторах

Беззапонная Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062; г. Екатеринбург, улица Мира, 22. ORCID 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID R-8727-2019; Scopus Author ID 6504618195; ID РИНЦ 119257;

e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Злобина Снежана Вадимовна, студент факультета управления и комплексной безопасности Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062; г. Екатеринбург, улица Мира, 22.

e-mail: snezhana.zlobina.18@mail.ru

Динисламов Марат Минирафитович, магистрант факультета заочного обучения и переподготовки кадров Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062; г. Екатеринбург, улица Мира, 22.

e-mail: ogpn_salavat@mail.ru

Выгузова Евгения Вячеславна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062; г. Екатеринбург, улица Мира, 22; AuthorID: 843290;

e-mail: e.wigusova@mail.ru

Information about the authors

Oksana V. Bezzaponnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ORCID 0000-0001-6566-448X; WOS Research ID R-8727-2019; Scopus Author ID 6504618195; ID RSCI 119257;

e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Snezhana V. Zlobina, student of the Faculty of Management and Integrated Security of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation;

e-mail: snezhana.zlobina.18@mail.ru

Marat M. Dinislamov, master student of the Faculty of Correspondence Education and Retraining of Personnel of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation;

e-mail: ogpn_salavat@mail.ru

Evgenia V. Vyguzova, Cand. Sci (Pedagogical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forensic Science and Engineering and Technical Expertise of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; AuthorID: 843290;

e-mail: e.wigusova@mail.ru

УДК 614.844.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ НУЖД ПОЖАРОТУШЕНИЯ

**Двоенко Олег Викторович, Щербаков Николай Александрович,
Захаров Анатолий Иванович**

Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Целью данной статьи является обзор применяемых механизмов диспергирования жидкостей в существующих средствах подачи огнетушащих веществ. На основании анализа научно-технической литературы была проработана классификация существующих методов распыления жидкостей. Происходящие процессы в разных методах диспергирования весьма отличаются, если рассматривать с точки зрения механики образования капель и физического воздействия на жидкость. Тем не менее все методы распыления сводятся к тому, что жидкости необходимо сообщить энергию для образования дисперсной среды, энергетические затраты, в зависимости от метода, имеют широкие диапазоны. Так же в статье рассмотрены различные средства подачи тонкораспыленной воды, применяемые для нужд пожаротушения. Диспергирование жидкости обеспечивает высокоразвитую поверхность контакта взаимодействующих фаз, в связи с чем был рассмотрен процесс распыления в единстве со всеми физическими явлениями, протекающими в средствах подачи огнетушащих веществ, и на основании особенностей их конструктивных исполнений были отмечены преимущества и недостатки. Рекомендуется в целях повышения эффективности пожаротушения, с учетом механики распыления жидкостей, разрабатывать и совершенствовать средства с возможностью подачи тонкораспыленной воды, тем самым делая конструкции более простыми в эксплуатации, обслуживании, с ориентиром на их финансовую доступность в массовом сегменте.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, средства подачи, методы распыления жидкости, тушение пожаров

APPLICATION OF LIQUID DISPERSION MECHANISMS FOR FIRE EXTINGUISHING NEEDS

Oleg V. Dvoenko, Nikolay A. Shcherbakov, Anatoly I. Zakharov

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The purpose of this article is to review the applied mechanisms for dispersing liquids in existing means of supplying fire extinguishing agents. Based on the analysis of scientific and technical literature, a classification of existing methods for spraying liquids was worked out. The processes occurring in different dispersion methods are very different when viewed from the point of view of the mechanics of droplet formation and the

physical impact on the liquid. However, all spraying methods boil down to the fact that the liquid must be supplied with energy to form a dispersed medium, energy costs, depending on the method, have wide ranges. The article also discusses various means of supplying mist water used for fire extinguishing needs. Dispersion of the liquid provides a highly developed contact surface of the interacting phases, in connection with which the spraying process was considered in unity with all physical phenomena occurring in the means of supplying fire extinguishing agents, and based on the features of their design, advantages and disadvantages were noted. It is recommended, in order to improve the efficiency of fire extinguishing, taking into account the mechanics of spraying liquids, to develop and improve tools with the ability to supply mist water, thereby making the structures easier to operate, maintain, with a focus on their financial affordability in the mass segment.

Keywords: mist water, supply means, liquid spray methods, fire extinguishing

Введение

В современных инженерно-технических устройствах и установках активно происходит применение процесса диспергирования. Невозможно представить транспортную, сельскохозяйственную, строительную отрасли без механизмов, предназначенных для распыления жидкостей. В области пожаротушения данный процесс активно применяется в средствах подачи огнетушащих веществ и отличается положительной эффективностью. Связано это с более высокой поглощающей способностью тепла у капель меньшего диаметра за счет большей активной площади поверхности капель [1]. Взяв во внимание эту особенность, мы получаем главное преимущество, относительно традиционного водяного пожаротушения, а именно – снижение потенциального материального ущерба от излишне пролитой воды с повышением эффективности пожаротушения. Тонкораспыленная вода является безвредной для человека и может применяться для тушения помещений на объектах различного функционального назначения.

Аналитическая часть

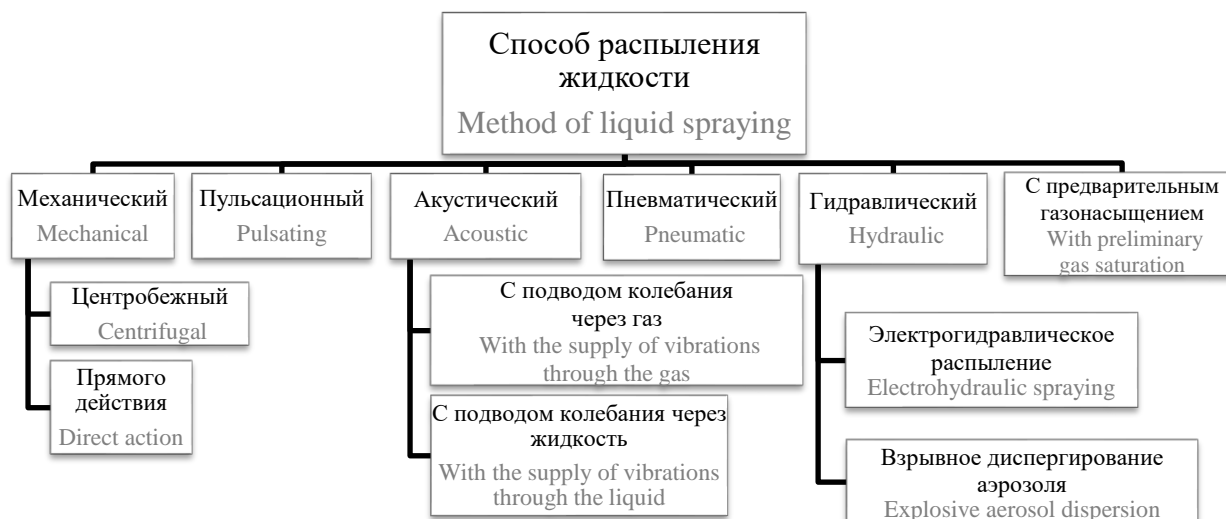
Аналитический обзор научно-технической литературы показал, что процессы

распыления жидких веществ рассмотрены детально во многих работах [2-6]. Как следствие, представляется возможным представить следующую классификацию способов распыления (рис. 1).

Пульсационное распыление является хорошим способом однородного и мелкого диспергирования жидкости. Более тонкое распыление достигается благодаря пульсациям давления и изменению расхода, вызывающим возмущения, которые усиливают дробление струи жидкости. Эти возмущения создаются периодическим перекрытием проходных каналов (или соплового отверстия) распылителя, что приводит к увеличению поверхностной энергии струи и быстрой потере устойчивости.

Для нужд пожаротушения способ не применяется по причине наличия в конструкции устройства подвижной части. Именно подвижная часть, перекрывающая проходной канал, делает устройство пожаротушения менее надежным в экстремальных условиях эксплуатации и может привести к травме участника тушения пожара.

Однако данный способ нашел активное применение в сельскохозяйственной отрасли (рис. 2).

**Рис. 1.** Классификация способов распыления**Fig. 1.** Classification of spraying methods**Рис. 2.** Пульсационный распылитель для полива растений**Fig. 2.** Pulsating sprayer for watering plants

Еще одним видом диспергирования жидкости является акустическое распыление. Это технология, которая использует звуковые волны для распыления жидкости. Основным принципом этой техники является использование ультразвуковых волн, которые создают высокочастотные колебания в жидкости, приводящие к ее распылению. Акустическое распыление имеет широкое применение в различных областях, включая фармацевтику,

пищевую и химическую промышленности, а также сельское хозяйство. Эта технология позволяет достичь равномерного и эффективного покрытия поверхности жидкостью, что делает ее незаменимой для процессов нанесения лаков, покраски и нанесения антисептиков. Однако этот метод имеет свои недостатки: высокая стоимость оборудования, сложность настройки и поддержания необходимых параметров процесса. По этим причинам на данный

момент использование данного метода в пожаротушении не представляется возможным.

Наиболее универсальным и простым способом распыления является механическое воздействие на жидкость. Этот способ нашел активное применение

в системах защиты объекта, а именно в автоматических установках пожаротушения. Примером механического распыления, чей принцип действия подобен в использовании конструкции центробежной форсунки, является ороситель (рис. 3).

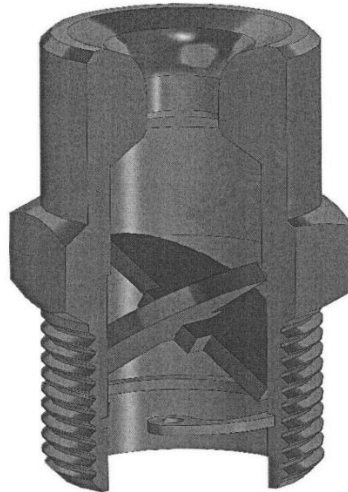


Рис. 3. Ороситель центробежный с диаметром выходного отверстия 9 мм

Fig. 3. Centrifugal sprinkler with an outlet diameter of 9 mm

Описание принципа работы центробежной форсунки были подробно рассмотрены в работе [6]. На рисунке 4 представлена центробежная форсунка, устройство которой взято за основу некоторых установок пожаротушения. Центробежная форсунка работает по следующему принципу: огнетушащее вещество поступает в камеру закручивания форсунки через тангенциальные каналы, где она приобретает вращательное движение. Затем огнетушащее

вещество поступает в сопло, где его частицы выходят по прямолинейным траекториям и образуют факел распыла. Угол φ можно выразить как отношение тангенциальной скорости вектора (под углом к оси сопла) к аксиальной скорости.

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{v_t}{v_z} \quad (1)$$

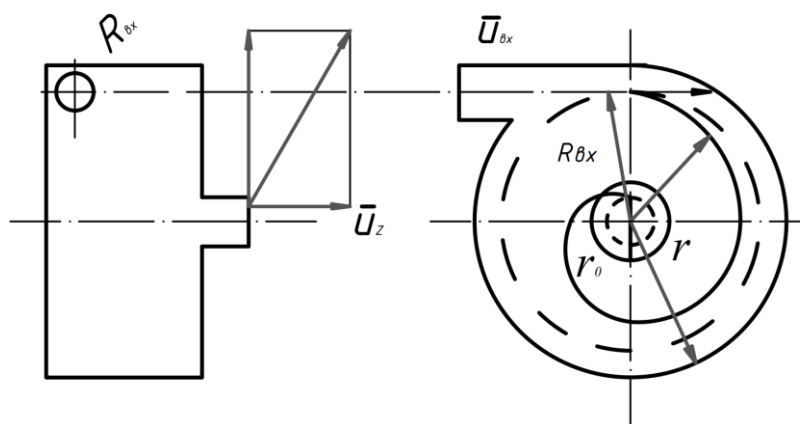


Рис. 4. Принципиальная схема работы центробежной форсунки

Fig. 4. Schematic diagram of the operation of a centrifugal nozzle

Профессор Генрих Наумович Абрамович разработал теорию идеальной центробежной форсунки, где рассматривается поток идеальной жидкости внутри форсунки. Данная теория получила применение в большом количестве инженерно-технических отраслей, в том числе была взята за основу при проектировании и создании реактивных двигателей. С учетом закона сохранения количества движения и отсутствия сил сопротивления возможно определить отношение скоростей на входе и на выходе из камеры форсунки. Тангенциальная составляющая скорости на выходе из камеры может быть выражена соотношением:

$$v_t = \frac{v_{\text{вх}} R_{\text{вх}}}{r}, \quad (2)$$

где r – радиус вращения элемента жидкости на выходе из камеры;

$R_{\text{вх}}$ – радиус вращения во входном сечении.

Полный напор, в соответствии с законом Бернулли, в пренебрежении разностью отметок на входе и выходе (по отношению к осевой плоскости) выявляет экспоненциальное убывание составляющей v_t , когда расстояние от оси увеличивается обратно пропорционально этому расстоянию в соответствии с формулой (2).

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v_z^2}{2g} + \frac{v_r^2}{2g} = \frac{p_{\text{вх}}}{\gamma} + \frac{v_z^2}{2g}, \quad (3)$$

где p , $p_{\text{вх}}$ – избыток давления в рассматриваемых сечениях. Напор одинаков для всех струй при заданных условиях на входе.

Если обратить внимание на выражения (2) и (3), то можно заметить, что жидкость не может заполнить выходное сечение. Если бы это произошло, то скорость на оси стала бы бесконечно положительной, а давление бесконечно отрицательным. Такое явление противоречит физической реальности, поэтому в центре сечения возникает воздушный вихрь с давлением, соответствующим давлению окружающей среды ($p_m = 0$).

Коэффициент живого сечения является показателем заполнения выходного сечения жидкости:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^2, \quad (4)$$

где r_m – вихревой радиус; r_0 – радиус выходного сечения.

При проведении расчетов эквивалентную скорость можно определить по следующей формуле:

$$v_{\text{э}} = \frac{Q}{\pi r_0^2} = v_z \varepsilon. \quad (5)$$

Из сопоставления выражений (3) и (5) представляется возможным получить эквивалентную и тангенциальную скорости на границе вихря:

$$v_{tm} = \frac{A v_{\text{э}}}{\sqrt{1-\varepsilon}}. \quad (6)$$

Рассматриваемая безразмерная величина определяется через формулу:

$$A = (R_{\text{к}} - r_{\text{вх}}) k_0 / n r_{\text{вх}}^2 \quad (7)$$

Она непосредственно описывает соотношение между тангенциальной скоростью жидкой струи на ее наружном слое и эквивалентной скоростью этой жидкости. Формулы для эквивалентной скорости и для расхода жидкости через форсунку устанавливаются по соотношению:

$$\begin{cases} v_{\text{э}} = \xi \sqrt{2gH} \\ Q = \xi \pi r_0^2 \sqrt{2gH} \end{cases} \quad (8)$$

При этом коэффициент расхода форсунки определяется:

$$\xi = 1 / \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1-\varepsilon}}. \quad (9)$$

Система уравнений (8) позволяет определить условие устойчивости максимального расхода, при заданном напоре. В этом случае $\frac{d\xi}{d\varepsilon} = 0$. Тогда:

$$\begin{cases} A = \frac{1-\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^3/2}} \\ \xi = \varepsilon \sqrt{\varepsilon/2 - \varepsilon} \end{cases} \quad (10)$$

Среднее значение угла конусности струи жидкости было получено путем подстановки среднего значения тангенциальной скорости в выражение (2):

$$tg\varphi = \frac{v_{\text{ср}}}{v_z} = \frac{(1-\varepsilon)\sqrt{8}}{(1+\sqrt{1-\varepsilon})\sqrt{\varepsilon}}. \quad (11)$$

Исследование работоспособности центробежной форсунки, выполненное Г. Н. Абрамовичем, подтверждает правильность его теории, но упускает из внимания вязкость, однако это необходимо учитывать, так как она может изменить параметры струи и коэффициент расхода форсунки за счет влияния на движение жидкости. Один из авторов, Л. Н. Клячко, учел эти изменения в камере закручивания, вызванные силами трения. Им была введена геометрическая эквивалентная характеристика:

$$A = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2}(R^2 - r_3^2)}, \quad (12)$$

где $r_3 = \sqrt{f_{\text{вх}}/\pi}$;

$\lambda = \frac{1,05}{Re^{0,3}}$ коэффициент на входном

сечении $Re = \frac{v_{\text{вх}} d_{\text{вх}}}{\nu}$;

$f_{\text{вх}}$ – суммарная площадь входных отверстий;

λ – коэффициент трения.

Благодаря усовершенствованной теории Л. А. Клячко и Г. Н. Абрамовича, которая интегрирует в себе силы трения, возможно описать процессы движения жидкости в центробежных форсунках и оценить ключевые выходные характеристики (объемный расход жидкости, угол распыла) на основе нескольких геометрических свойств конструкции форсунки.

Детально рассмотрев вышеуказанный способ, стоит отметить, что приобретение жидкостью кинетической энергии достигается посредством действия центробежных сил, и в дальнейшем, происходит процесс дробления на капли. Представляется возможным определить средний диаметр капель, ориентируясь на условия равенства действующих на диспергируемую жидкость центробежной силы и силы поверхностного натяжения, из чего следует зависимость:

$$D = \frac{C}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{2R\rho}}, \quad (13)$$

где C – константа;

ρ – плотность ОТВ;

σ – поверхностное натяжение ОТВ;

R – радиус диска;

ω – угловая скорость ОТВ.

В справедливости данной зависимости возможно удостовериться, ориентируясь на множество исследований [7–9], которые проводились при разной угловой скорости вращения от 30 до 1000 с⁻¹, а диаметр получаемых капель варьировался от 0,03 до 4 мм.

Стоит отметить, что для нужд пожаротушения во многих случаях необходимо знать величину Q характеризующую расход огнетушащего вещества:

$$Q = \xi \pi r_0^2 \sqrt{2gH}, \quad (14)$$

где ξ – коэффициент расхода форсунки,

r_0 – радиус выходного сечения;

H – полный напор;

g – ускорение свободного падения.

Получаемый при этом распыл характеризуется высокой монодисперсностью. К преимуществам такого способа распыления стоит отнести возможность диспергирования огнетушащих веществ с высокой вязкостью, а также загрязненных. Тем не менее корректировки, связанные с производительностью распыления устройства, не оказывают существенного влияния на дисперсность жидкости.

В свою очередь, второй способ получения тонкораспыленной воды построен по принципу форсунки прямого действия. Примером данной конструкции, реализующим такой способ получения тонкораспыленной воды, является дренчерный ороситель HI-FOG (рис. 5).

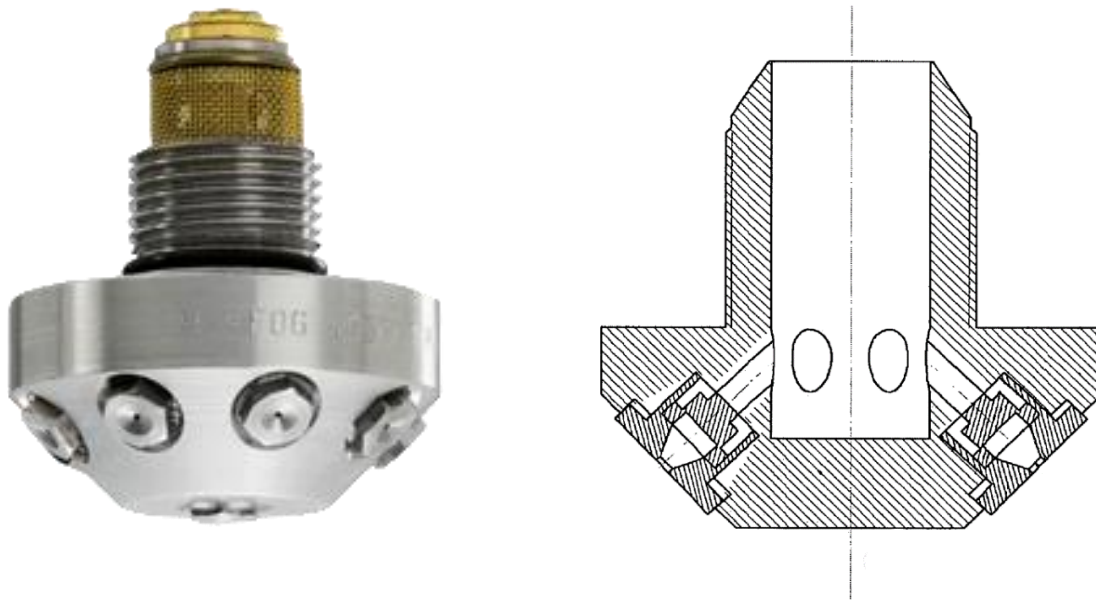


Рис. 5. Дренчерный ороситель с форсунками прямого действия HI-FOG

Fig. 5. Deluge sprinkler with HI-FOG direct nozzles

Основным элементом конструкции является корпус, который представляет собой усеченный конус, на боковой поверхности которого равноудаленно друг от друга расположено 6 форсунок, в корпусе расположен внутренний коллектор. Принцип действия основан на создании высокого давления в корпусе распылителя 8–14 Мпа, под действием которого происходит вытеснение воды через отверстия равные 1–3 мм. Теоретический расход струи жидкости Q представляется возможным вычислить по формуле 15:

$$Q = \mu F \sqrt{2\rho \cdot \Delta p}, \quad (15)$$

где μ – коэффициент, зависящий от режима течения «отрывной/безотрывной» и вида края кромки;

F – площадь струи жидкости в сечении среза сопла форсунки;

ρ – плотность жидкости;

Δp – разница давлений окружающей среды и внутри форсунки.

Конструкция обеспечивает равномерное диспергирование жидкости. Недостатком данного распылителя является то, что энергия, которую необходимо сообщить жидкости, весьма велика, что требует усиленной конструкции и накладывает дополнительные условия на систему подачи жидкости. Также по причине маленького диаметра отверстий форсунок существует вероятность их засорения.

Конструкции, чей принцип действия основан на механизме пневматического диспергирования жидкостей, активно применяются в штатных системах защиты объекта от пожара и на мобильных средствах пожаротушения. С положительной стороны зарекомендовала себя автоцистерна пожарная АЦ-3,0-40 на шасси КАМАЗ 43502, в которой подача диспергированного огнетушащего вещества обеспечивается системой тушения ТРВ HIROMAX (рис. 6).



Рис. 6. АЦ-3,0-40 (43502) с системой тушения ТРВ HIROMAX

Fig. 6. АЦ-3,0-40 (43502) with HIROMAX water mist fire extinguishing system

Метод пневматического распыления основан на динамическом взаимодействии потока жидкости с потоком распыляющего газа, который выходит в канал с большей скоростью (50–300 м/с). Именно разность скоростей потоков посредством силы трения обеспечивает закрепление струи жидкости с одной стороны, тем самым производя вытягивание. Эти струи в местах утончения быстро распадаются и приводят к образованию мелких капель. К достоинствам следует отнести однородное диспергирование, возможность распылять жидкости различной вязкости. Недостатками такого типа устройства являются повышенный расход энергии в срав-

нении с другими способами, необходимость в распыливающем агенте и связанном с ним оборудованием.

Метод импульсного (взрывного) диспергирования является не столь распространенным в области пожаротушения, но все же стоит упомянуть его в связи с перспективностью. Наибольший вклад в разработки данных систем пожаротушения были сделаны профессором Владимиром Дмитриевичем Захматовым и отечественной компанией ООО «Айфэкс Технологии» [11–13]. Наглядным примером механизма получения тонкораспыленной воды вышесказанным методом является распылитель пиротехнической жидкостный (рис. 7) и ранцевая система импульсного пожаротушения (рис. 8).

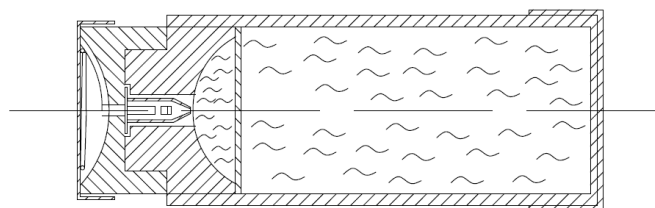


Рис. 7. Распылитель пиротехнической жидкостный

Fig. 7. Liquid pyrotechnic sprayer

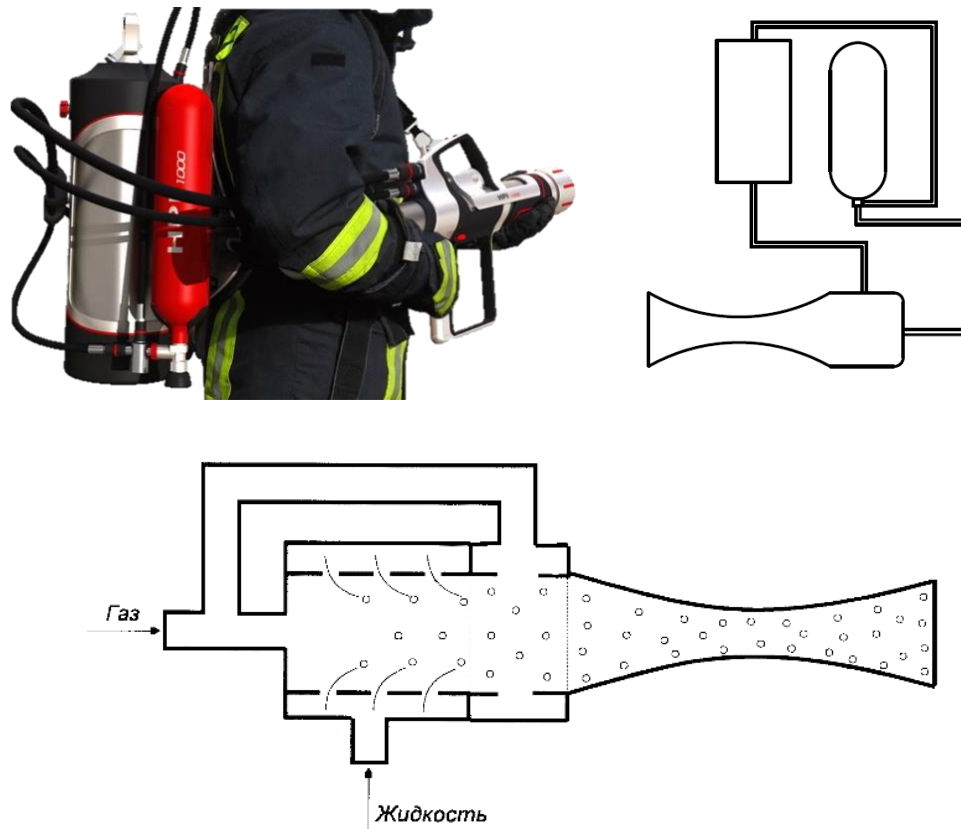


Рис. 8. Система импульсного пожаротушения (сокращенно IFEX)

Fig. 8. Impulse fire extinguishing system (abbreviated as IFEX)

Распылитель приводится в действие посредством высвобождения энергии взрывчатого вещества. В системе происходит резкое повышение давления, газы, полученные в результате взрыва, оказывают импульсное воздействие на огнетушащее вещество. Ударная волна на границе выхода ОТВ с воздухом становится причиной образования кавитационных пузырьков, что является существенным условием для создания мелкодисперсного аэрозоля [16].

При взрыве взрывчатого вещества продукты детонации стремительно расширяются, заставляя воду пройти через сопловое отверстие, освобождая свое пространство. Это вызывает вытеснение кавитационных пузырьков, которые находятся в воде. По мере того как вода выходит, давление снижается, приводя к замедлению прохождения жидкости. Если каждый кавитационный пузырек распределяется

равномерно в объеме жидкости, то каждая единица объема жидкости будет содержать пузырек, наполненный парами. Данные включения появляются в потоке, нарушают его сплошность. Давление в камере влияет на диаметр этих включений. Элементы разрушаются при расширении пара и создают капли жидкости, которые в свою очередь формируют аэрозоль. В результирующем аэрозоле могут находиться различные частицы, такие как микронные, субмикронные и крупные. Крупные частицы могут быть разделены на более мелкие за счет трения воздуха в процессе движения. Обозначим динамическое давление окружающей среды как P_d :

$$P_d = \frac{\rho_0 v^2}{2}, \tag{16}$$

где u – скорость движения капли;
 ρ_0 – плотность среды.

Для определения диаметра частиц результирующего аэрозоля важно учитывать движение потока через выходное сопло и разрушение сплошности потока при помощи лопающихся пузырьков. Кроме того, кавитационные пузырьки имеют аналогичное воздействие на поток, как и пузырьки воздуха при предварительном газонасыщении жидкости.

Стоит отметить, что большие капли аэрозоля, подвергаясь динамическому давлению среды, разрушаются до того, как достигнут минимальный размер капель [6]:

$$D_{min} = \frac{4 \cdot \sigma}{\rho_0 v^2}, \quad (17)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

В гидравлическом приближении скорость истечения пароводяной смеси v находится из соотношения:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p - p_0)}, \quad (18)$$

где ρ – плотность смеси пара и воды.

В соответствии с формулой (18) можно установить, что скорость выхода пара и воды из смеси составляет величину от 150 до 200 м/с. Также, согласно формуле (17), наименьший размер капель составляет 10–15 мкм (для воды).

Тем не менее в аэрозоле, получаемом в рассматриваемой конструкции распылителя, размер капель характеризуется своей неоднородностью 0,03–15 мкм. Разовость применения конструкции – самый большой недостаток, однако, взяв во внимание мобильность, которая позволяет приступить к тушению пожара на его начальной стадии, а также возможность распыления относительно большого количества огнетушащего вещества в очень короткий промежуток времени, позволяют сказать о высокой эффективности таких средств пожаротушения.

Заключение

Рассмотрев детально все известные на сегодняшний день способы диспергирования жидкостей, стоит отметить, что с физической точки зрения каждый из способов имеет весьма различный процесс образования капель. Как следствие, у каждого из способов распыления имеются свои достоинства и недостатки, которые необходимо рассматривать с позиции применяемой области. Для нужд пожаротушения необходимо распылять жидкости в больших объемах, конструкция распылителя должна быть надежной, а затраты на изготовление средства тушения пожара конкурентными. Ориентируясь на данные показатели, способы механического и пневматического распыления, с учетом современных технологий, остаются наиболее оптимальными для тушения пожаров, имеющих большую площадь. Способ импульсного диспергирования показывает высокую эффективность при локализации небольших очагов. Остальные способы распыления на данный момент не нашли широкого применения в области пожаротушения. Теоретическая и практическая базы диспергирования жидкостей активно развиваются. На основании этого открываются новые способы и, как следствие, разрабатываются новые устройства, интеграция которых в пожаротушении может принести положительный эффект. Применение устройств подачи мелкодисперсных капель в пожаротушении имеет положительный опыт и весьма перспективно в связи с повышением процента огнетушащего вещества, которое принимает участие в пожаротушении. Уменьшение количества применяемого ОТВ позволит снизить вес рукавных линий и, как следствие, приступить к тушению пожара на ранней стадии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Виноградов А. Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 4. С. 72–84.
2. Архипов В. А., Шереметьева У. М. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность. Томск, 2007. 136 с.
 3. Шкарабура Г. Н., Захматов В. Д., Щербак Н. В. Импульсная техника многоплановой защиты. Возможности использования на транспорте // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. М., 2010. Вып. 7–8. С. 76–84.
 4. Пажи Д. Г., Корягин А. А., Ламм Э. Л. Распыливающие устройства в химической промышленности. М., 1975. 200 с.
 5. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей // Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М., 1984. 324 с.
 6. Витман Л. А., Кацнельсон Б. Д., Палеев И. И. Распыливание жидкости форсунками. М.; Л., 1962. 264 с.
 7. Бондарюк М. М., Ильяшенко С. М. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М., 1958. 440 с.
 8. Дунский В. Ф., Никитин Н. В.. Распыление жидкости вращающимся распылителем при обдуве его воздушным потоком // Инженерно-физический журнал 1983. Т. 44, №3. С. 390-396.
 9. Дунский В. Ф., Южный З. М. Монодисперсные аэрозоли // Аэрозоли в сельском хозяйстве. М., 1956. С. 7–18.
 10. Абрашкин В. Ю. Физические основы теплотехнических измерений. Самара, 2012. С. 34–37.
 11. Захматов, В. Д., Турсенев, С. А., Булатов, В. О. Организация при Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России добровольной пожарной команды быстрого реагирования, оснащенной новыми видами пожарной техники импульсного распыления огнетушащих составов // Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций : Материалы Междунар. научн.-практ. конф. Санкт-Петербург, 14 июня 2019 года. СПб., 2019. С. 334–340. EDN BVDUBN.
 12. Захматов, В. Д., Щербак, Н. В. Системы импульсного тушения лесных пожаров // Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сб. науч. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 23–25 апреля 2015 года. СПб., 2015. С. 226–232. EDN ZDSJCH.
 13. Захматов, В. Д. Самоуправляемые автоматические системы импульсного пожаротушения и многоплановой защиты // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 6. С. 59–68. EDN PAOITN.
 14. Патент № 2795921 С2 Российская Федерация, МПК А62С 13/20, А62С 19/00, А61Р 17/02. Компактный импульсный распылитель противоожогового агента для тушения горящей одежды на человеке и спасения его от ожогов : № 2021106640 : заявл. 29.09.2020 : опубл. 15.05.2023 / Захматов В. Д., Булатов В. О., Щербак Н. В. EDN LTVTTC.
 15. Патент № 2121390 С1 Российская Федерация, МПК А62С 31/02, А62С 2/00, А62С 3/02. Установка для пожаротушения : № 97107903/12 : заявл. 14.05.1997 : опубл. 10.11.1998 / Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. ; заявитель Научно-исследовательский институт низких температур при МАИ (Московском государственном авиационном институте – техническом университете). EDN WXIBOO.
 16. Несветайлов Г. А., Серебряков Е. А. Теория и практика электрогидравлического эффекта. Минск, 1966. 244 с.

REFERENCES

1. Vinogradov A.G. Absorption of thermal radiation by water curtains. Part 2. Fire and explosion safety. 2013; 22(4):72–84. (rus).
2. Arkhipov V.A., Sheremetyeva U.M. Aerosol systems and their impact on life. Tomsk, TPU Publishing House, 2007; 136. (rus).
3. Shkarabura G.N., Zakhmatov V.D., Shcherbak N.V. Impulse technique of multiplan protection. Possibilities of use in transport. Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. Moscow, STC "Informtehnika", 2010;7–8:76–84. (rus).
4. Pages D.G., Koryagin A.A., Lamm E.L. Spray devices in the chemical industry. Moscow, Chemistry, 1975; 200. (rus).
5. Pages D.G., Galustov V.S. Fundamentals of fluid spraying technique. Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology Moscow, Chemistry, 1984; 324. (rus).
6. Vitman L.A., Katsnelson B.D., Paleev I.I. Spraying liquid with nozzles. Moscow, Gosenergoizdat, 1962; 264. (rus).
7. Bondaryuk M.M., Ilyashenko S.M. Direct-flow air-jet engines. Moscow, Oborongnz, 1958; 440. (rus).

8. Dunsky V.F., Nikitin N.V. Spraying liquid with a rotating spray gun when blowing it with an air stream // Engineering and Physics Journal, 1983, 44(3):390–396. (rus).
9. Dunsky V.F., Yuzhny 3.M. Monodisperse aerosols. Aerosols in agriculture. Moscow, Selkhozgiz, 1956; 7–18. (rus).
10. Abrashkin V.Yu. Physical foundations of thermotechnical measurements. Samara. SSAU, 2012; 34–37. (rus).
11. Zakhmatov V.D., Tursenev S.A., Bulatov V.O. Organization of a voluntary rapid response fire brigade at St. Training of personnel in the system of prevention and elimination of consequences of emergency situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, June 14, 2019. St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, 2019; 334–340. (rus).
12. Zakhmatov V.D., Shcherbak N.V. Systems of impulse extinguishing of forest fires. Safety in emergency situations: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 23–25, 2015 year. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. St. Petersburg, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2015; 226–232. (rus).
13. Zakhmatov V.D. Self-controlled automatic systems of impulse fire extinguishing and multifaceted protection. Fire and explosion safety. 2012; 21(6): 59–68. (rus).
14. Patent No. 2795921 C2 Russian Federation, IPC A62C 13/20, A62C 19/00, A61P 17/02. Compact impulse anti-burn agent sprayer for extinguishing burning clothes on a person and saving him from burns: No. 2021106640: Appl. 09/29/2020 : publ. May 15, 2023 / V. D. Zakhmatov, V. O. Bulatov, N. V. Shcherbak. (rus).
15. Patent No. 2121390 C1 Russian Federation, IPC A62C 31/02, A62C 2/00, A62C 3/02. fire extinguishing installation : No. 97107903/12 : Appl. 05/14/1997: publ. 11/10/1998 / Yu. V. Zuev, A. V. Karpyshev, I. A. Lepeshinsky; applicant Research Institute for Low Temperatures at MAI (Moscow State Aviation Institute - Technical University). (rus.).
16. Nesvetailov G.A., Serebryakov E.A. Theory and practice of electrohydraulic effect. Minsk, Science and technology, 1966; 244. (rus).

Информация об авторах

Двоенко Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры пожарной техники (в составе учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники), Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; SPIN-код: 2013-9651, AuthorID: 772016 e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Щербаков Николай Александрович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID 1142294; e-mail: snikolais@bk.ru

Захаров Анатолий Иванович, старший преподаватель кафедры пожарной техники (в составе учебно-научного ком-

Information about the authors

Oleg V. Dvoenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fire Engineering (as part of the educational and scientific complex of fire and rescue equipment) of State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 2013-9651, AuthorID: 772016

Nikolay A Shcherbakov., post graduate student of State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1142294; e-mail: snikolais@bk.ru

Anatoly I Zakharov, Senior lecturer of the Department of Fire Engineering (as part of the educational and scientific complex of fire and rescue equipment) of State Fire

плекса пожарной и аварийно-спасательной техники), Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; SPIN-код: 1432-2824, AuthorID: 1021604

Academy of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 1432-2824, AuthorID: 1021604

УДК 614.844.2

ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПЛАМЕНИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ВОДЯНЫМ ТУМАНОМ

**Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна,
Тужиков Евгений Николаевич**

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Высокодисперсный водяной туман (ВВТ) – это устойчивый аэрозоль, состоящий из воздушной дисперсионной среды и распределенных в ней мельчайших капель воды, заутеровский диаметр которых составляет несколько микрон. В последние годы ведутся исследования по применению ВВТ для целей пожаротушения, это обусловлено тем, что ВВТ – экологически чистый высокоэффективный пожаротушающий агент с газообразными свойствами, позволяющий реализовать объемный способ тушения и минимизировать ущерб от пожара. Эксперименты по тушению ВВТ пламени проводились в замкнутой испытательной камере, где ВВТ образуется с помощью ультразвукового генератора. В ходе исследования было обнаружено новое явление, заключающееся в возникновении долговременных долгопериодических автоколебательных процессов при тушении ВВТ диффузионного пламени. По результатам исследования определены значения тушащей концентрации ВВТ, которая в рамках эксперимента практически не зависит как от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Проведен анализ возможных механизмов обратной связи в обнаруженных автоколебательных процессах, на основании чего сделан вывод о влиянии типа и механизма обратной связи на периодичность этих процессов.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, объемное пожаротушение, ультразвуковое распыление, автоколебательный процесс

LONG-PERIODIC AUTO-OSCILLATORY PROCESSES IN FLAME EXTINGUISHING BY HIGHLY DISPERSED WATER MIST

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

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

ABSTRACT

Highly dispersed water mist (HWM) is a stable aerosol consisting of an air dispersion medium and the smallest water droplets distributed in it, with a Sauter mean diameter of a few microns. In recent years, research has been conducted on the application of HWM for fire extinguishing purposes, this is due to the fact that HWM is an environmentally friendly highly effective fire extinguishing agent, with gaseous properties, allowing to implement a volumetric method of extinguishing and minimize fire damage.

HWM flame extinguishing experiments were conducted in a closed test chamber where the HWM is generated using an ultrasonic generator. In the course of the study, a new phenomenon was discovered, which consists in the occurrence of long-term long-periodic auto-oscillatory processes during the extinguishing of HWM diffusion flames. According to the results of the study, the values of the extinguishing concentration of HWM were determined, which within the framework of the experiment practically does not depend both on the intensity of HWM supply and on the type and power of flame sources. The possible feedback mechanisms in the detected auto-oscillatory processes were analyzed, on the basis of which a conclusion was made about the influence of the type and mechanism of feedback on the periodicity of these processes.

Keywords: highly dispersed water mist, volumetric fire extinguishing, ultrasonic atomization, auto-oscillation process

Введение

Для эффективного объемного пожаротушения требуются водные аэрозоли высокой устойчивости, дисперсности и концентрации, создаваемые за короткое время. В пожаротушении, в частности применительно к гибридным установкам объемного пожаротушения, под водяным туманом подразумевается относительно устойчивый аэрозоль, состоящий из газовой дисперсионной среды и распределенных в ней капель воды, заутеровский диаметр которых не превышает 65 мкм [1]. Необходимо указать, что для капель воды диаметром более 30 мкм основной вклад в уменьшении их концентрации в объеме (разрушение тумана) вносит гравитационное осаждение [2]. По этой причине время существования (разрушения) туманов, созданных на основе даже таких новейших технологий, как гибридные установки пожаротушения, не превышает нескольких минут.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что эффективность объемного пожаротушения увеличивается с ростом дисперсности распыляемой и подаваемой на тушение воды [3].

Для получения высококонцентрированного устойчивого водяного тумана, для целей объемного пожаротушения,

в последние годы ведутся исследования высокодисперсного водяного тумана (ВВТ), получаемого с помощью ультразвукового генератора [4]. Принцип работы такого

генератора основан на образовании ВВТ при воздействии на тонкий слой воды ультразвуковых колебаний пьезокерамического излучателя. Время существования ВВТ в замкнутом объеме может составлять несколько часов [5], а генерируемые капли имеют очень узкое распределение по размерам и заутеровский диаметр в несколько микрон [6]. В настоящее время уже имеются серийные ультразвуковые генераторы ВВТ производительностью около 1 л/мин, что позволяет после незначительной доработки использовать их в системах объемного пожаротушения.

Следует отметить, что только ультразвуковая технология распыления воды на настоящий момент может обеспечить одновременную реализацию таких характеристик распыления, как высокая производительность, однородность и дисперсность, требуемых для создания устойчивого ВВТ для целей объемного пожаротушения.

Нами не найдено отечественных научных публикаций, посвященных этой тематике, отсюда следует вывод об актуальности проведения научно-исследования

тельских работ, направленных на исследование объемного пожаротушения ВВТ, образуемого ультразвуковым генератором.

Экспериментальная методика

Обозначения и исходные данные:

C – тушащая концентрация ВВТ, г/м³;
 Q – низшая теплота сгорания горючего, МДж/кг;
 W – тепловая мощность источника пламени, Вт;
 G – массовый расход ВВТ, г/мин;
 t_1 – время тушения или время начала колебаний пламени, мин;
 t_0 – время достижения 100 % влажности в объеме камеры, мин;

P – усредненное атмосферное давление при измерениях (0,098 МПа);
 T – усредненная температура окружающего воздуха при измерениях (298 К);
 V – свободный объем испытательной камеры (0,084 м³);
 M_0 – влагосодержание воздуха при 30 % влажности (6,9 г/м³);
 M_1 – влагосодержание воздуха при 100 % влажности (23,1 г/м³);
 Усредненная относительная влажность окружающего воздуха \approx 30 %.

Схема основного экспериментального оборудования, созданного для проведения настоящего исследования, приведена на рис. 1.

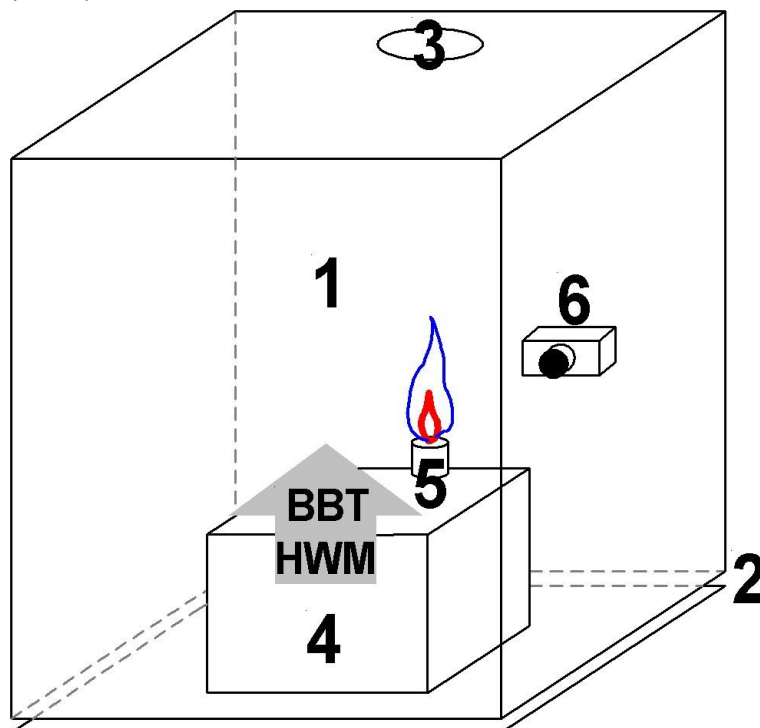


Рис. 1. Схема испытательного стенда для тушения пламени с помощью ВВТ: 1 – испытательная камера; 2 – входной проем; 3 – выходной проем; 4 – ультразвуковой генератор ВВТ; 5 – источник пламени; 6 – видеокамера

Fig. 1. Schematic diagram of the test bench for flame extinguishing with HWM where: 1 – test chamber; 2 – entrance aperture; 3 – exit aperture; 4 – ultrasonic generator of HWM; 5 – flame source; 6 – video camera

Для исследования тушения пламени ВВТ был создан испытательный стенд (рис. 1), состоящий из замкнутой испытательной камеры (1) с прозрачными стен-

ками и регулируемые по площади входным (2) и выходным (3) проемами. Свободный объем камеры составлял 84 л. Внутри камеры размещался ультразвуковой генератор ВВТ (4) и источник пламени (5). За

пределами испытательной камеры, на расстоянии $\approx 0,2$ м от источника пламени, размещалась видеокамера (6) для видеофиксации поведения пламени при экспериментах.

Используемый ультразвуковой генератор ВВТ с частотой колебаний пьезо-керамического излучателя 1,7 МГц генерирует капли со средним заутеровским диаметром в диапазоне 4–5 мкм. Расход ВВТ регулировался ультразвуковым генератором в пределах от 1,8 до 8 г/мин. В качестве источника пламени использовались: парафиновые свечи, спиртовая и газовая горелки. Во всех источниках пламени осуществлялся диффузионный режим горения. Для фитилей источников

пламени применялись шнуры из высоко-температурного стекловолокна. Тепловая мощность источников пламени составляла от 20 до 300 Вт.

Исследования проводились при различных расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. Расход ВВТ и горючего определялись с помощью взвешивания. Тепловая мощность источника пламени W определялась, при свободном горении без подачи ВВТ, исходя из расхода горючего и справочных данных по низшим теплотам сгорания Q используемого горючего [7]. Характеристики источников пламени приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики источников пламени

Table 1.

Characteristics of flame sources

№	Источник пламени Flame source	Горючее Fuel	Молекулярная формула Molecular formula	Q , МДж/кг Q , MJ/kg	W , Вт W , W
1	Парафиновая свеча Paraffin candle	Парафин Paraffin	$C_{26}H_{54}$	45,8	38–111
2	Спиртовая горелка Alcohol burner	Изопропанол Isopropanol	C_3H_8O	34,1	56
3	Газовая горелка с фитилем Gas burner with a wick	Пропан-бутан Propane-butane	$C_3H_8-C_4H_{10}$	46,8	21–55
4	Газовая горелка без фитиля Gas burner without wick	Пропан-бутан Propane-butane	$C_3H_8-C_4H_{10}$	46,8	58–293

Давление, температура и относительная влажность окружающего воздуха во время экспериментов были вблизи 0,098 МПа, 298 К и 30 % соответственно.

На основании максимальной мощности источников пламени, расчетов реакций горения и предварительных экспериментов были выбраны площади и расположения входного и выходного проемов испытательной камеры. Площади проемов

$\approx 6,5$ см². Расположение источника пламени и проемов указано на рис. 1.

Площади проемов были достаточны для поддержания нормального горения наиболее мощного источника пламени, при этом унос ВВТ из испытательной камеры был незначителен. Расположение проемов обеспечивало максимально быстрое для данной конфигурации оборудова-

ния, удаление продуктов сгорания и насыщение поступающего в камеру воздуха ВВТ.

Для определения концентрации ВВТ при тушении пламени и времени ее достижения были проведены эксперименты при различных расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. Схема экспериментов была следующей: в испытательной камере включался ультразвуковой генератор ВВТ и зажигался источник пламени. В процессе эксперимента проводилась видеосъемка пламени, фиксировались: время, расходы ВВТ и горючего. Для каждого опытного сценария проводилось не менее трех экспериментов с одинаковыми, в пределах ошибки измерений, условиями.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов было установлено, что при многих сценариях тушения пламени, перед полным прекращением горения, наблюдались долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения. Интенсивность горения при этом менялась от максимальной для данного источника пламени до практического отсутствия пламенного горения. При минимальной интенсивности горения, наблюдаемой в процессе указанных колебаний, сохранялось преимущественно тлеющее горение или свечение, сосредоточенное на кончике фитиля источника пламени. Все остальные параметры оставались неизменными на протяжении каждого из экспериментов.

Для всех источников пламени, в которых использовались фитили (табл. 1, источники № 1, 2, 3), были зафиксированы долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения в определенном диапазоне изменения расхода ВВТ. Для расходов ВВТ ниже 1.8 г/мин периодических изменений интенсивности горения не наблюдалось, полного прекращения горения не достигалось.

Для газовой горелки без введенного в пламя фитиля (табл. 1 источник № 4) тушение пламени происходило без колебаний интенсивности горения, что объясняется отсутствием после прекращения пламенного горения раскаленного фитиля как источника зажигания.

Максимальная длительность обнаруженных колебаний интенсивности горения наблюдалась для одного из сценариев по тушению парафиновой свечи (табл. 1 источник № 1) и составила 1245 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 40 до 55 с.

Для спиртовой горелки (табл. 1 источник № 2) наблюдались колебания интенсивности горения общей продолжительностью до 189 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 0,3 до 0,4 с эти сравнительно быстрые колебания перемежались с периодами относительно спокойного горения длительностью до 5 с.

Для газовой горелки с введенным в пламя фитилем (табл. 1 источник № 3) наблюдались колебания интенсивности горения общей продолжительностью до 162 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 0.5 до 1.6 с.

Долгопериодические колебания интенсивности горения, обнаруженные в настоящем исследовании, возникают самопроизвольно и имеют установившийся характер, следовательно, они относятся к автоколебательным явлениям [8].

Затухание колебаний пламени с последующим полным прекращением горения, наблюдаемые при проведении настоящего исследования, вызваны как накоплением продуктов горения в объеме испытательной камеры, так и повышением в ней температуры; последнее, в свою очередь, ведет к увеличению интенсивности образования ВВТ в ультразвуковом генераторе.

Упоминаний о долговременных долгопериодических автоколебательных

процессах при тушении пламени, подобных тем, что были обнаружены при проведении настоящего исследования, в научных источниках не найдено. Все ранее исследованные автоколебательные процессы в пламени относятся к акустическим колебаниям с частотой более 20 Гц [8].

На рис. 2 приведена зависимость времени тушения (для газовой горелки без фитиля; табл. 1 источник № 4) или начала периодических изменений интенсивности горения t_1 от массового расхода ВВТ G для различных источников пламени.

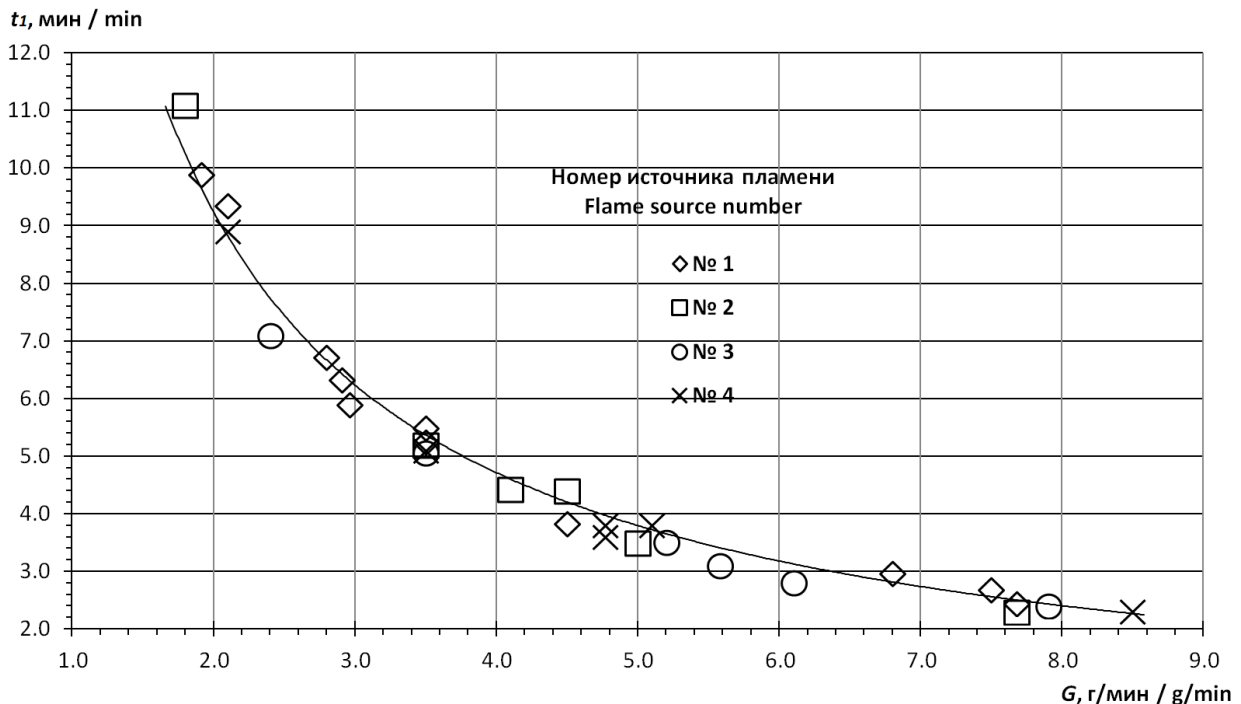


Рис. 2. Зависимость времени тушения (для газовой горелки без фитиля; табл. 1 источник № 4) или начала периодических изменений интенсивности горения от массового расхода ВВТ для различных источников пламени

Fig. 2. Dependences of extinguishing time (for a gas burner without a wick; table 1; source No. 4) or the start of periodic changes in combustion intensity on the mass flow rate of HWM for different flame sources

Из данных, приведенных на рис. 2 следует, что при увеличении массового расхода ВВТ время тушения или время начала периодических изменений интенсивности горения уменьшается, что закономерно и не требует дополнительных пояснений.

Наличие долгопериодических автоколебательных процессов при тушении пламени ВВТ свидетельствует, что во время этих процессов интегральная концентрация ВВТ в объеме камеры остается примерно постоянной. Этот вывод согласуется с литературными данными,

свидетельствующими о том, что с увеличением концентрации ВВТ скорость его разрушения также увеличивается [9].

Из вышеизложенного следует, что для каждого значения расхода ВВТ, при прочих неизменных параметрах эксперимента, существует предельно достижимая концентрация ВВТ, при которой расход ВВТ оказывается равным скорости его разрушения.

На основании этого вывода оценим значение концентрации ВВТ, при которой происходит тушение или начинаются пери-

одические изменения интенсивности горения, что свидетельствует о достижении концентрацией ВВТ диапазона тушащих концентраций. Для упрощения расчетов сделаем допущение, что до достижения предельной концентрации ВВТ (для данного расхода ВВТ) концентрация ВВТ линейно зависит от времени подачи ВВТ. При этом из времени тушения или времени начала колебаний пламени t_1 необходимо вычесть время увлажнения воздуха в объеме камеры до состояния полного насыщения водяными парами t_0 , т. к. ВВТ начинает накапливаться только после достижения 100 % влажности в объеме камеры. Последнее заключение следует из литературных данных о том, что процесс искусственного туманообразования можно разделить на две части: увлажнение воздуха до состояния полного насыщения водяными парами, а затем создание атмосферы витающих, свободно перемещающихся в различных направлениях мельчайших капелек воды [5].

Из эксперимента нам известно время тушения или начала периодических изменений интенсивности горения t_1 при

тушении пламени ВВТ. Время достижения 100 % влажности в объеме камеры t_0 формула (1) определяется на основании экспериментальных значений объема испытательной камеры V , расхода ВВТ – G ; и справочных данных [10] по влагосодержанию воздуха – M_0, M_1 при давлении – 0.098 МПа, температуре 298 К, относительной влажности – 30 % и 100 % соответственно.

$$t_0 = \frac{(M_1 - M_0)V}{G} \quad (1)$$

Исходя из вышеуказанных допущений, значение тушащей концентрации ВВТ – C может быть определено по формуле (2).

$$C = \frac{(t_1 - t_0)G}{2V} \quad (2)$$

В таблицах 2, 3, 4 приведены усредненные значения: массового расхода ВВТ – G , тушащей концентрации ВВТ – C , времени достижения 100 % влажности в объеме испытательной камеры – t_0 , времени начала периодических изменений интенсивности горения – t_1 и мощности источников пламени – W при тушении источников пламени № 1, 2, 3.

Таблица 2.

Расходные и временные характеристики тушения ВВТ источника пламени № 1

Table 2.

Flow and time characteristics of HWM extinguishing of flame source No. 1

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
1,9	38	0,71	9,9	105
2,1	38	0,65	9,4	109
2,8	111	0,48	6,7	104
2,9	38	0,47	6,3	102
3,0	38	0,46	5,9	96
3,5	111	0,39	5,3	101
3,5	111	0,39	5,5	107
4,5	111	0,30	3,8	95
6,8	111	0,20	3,0	112
7,5	38	0,18	2,7	112
7,7	111	0,18	2,5	104

Таблица 3.

Расходные и временные характеристики тушения
ВВТ источника пламени № 2

Table 3.

Flow and time characteristics of HWM
extinguishing of flame source No. 2

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
1,8	56	0,75	11,1	111
3,5	56	0,39	5,2	100
4,1	56	0,33	4,4	100
4,5	56	0,30	4,4	110
5,0	56	0,27	3,5	96
7,7	56	0,18	2,3	97

Таблица 4.

Расходные и временные характеристики
тушения ВВТ источника пламени № 3

Table 4.

Flow and time characteristics of HWM
extinguishing of flame source No. 3

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
2,4	21	0,57	7,1	101
3,5	49	0,39	5,1	97
5,2	55	0,26	3,5	100
5,6	27	0,24	3,1	103
6,1	25	0,22	2,8	102
7,9	51	0,17	2,4	105

В таблице 5 приведены усреднен-
ные значения: массового расхода ВВТ – G ,
тушащей концентрации ВВТ – C , времени
достижения 100 % влажности в объеме

испытательной камеры – t_0 , времени туше-
ния – t_1 и мощности источников пламени –
 W при тушении источника пламени № 4.

Таблица 5.

Расходные и временные характеристики тушения ВВТ источника пламени № 4

Table 5.

Flow and time characteristics of HWM extinguishing of flame source No. 4

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
2,1	206	0,65	8,9	103
3,5	58	0,39	5,1	98
4,8	63	0,28	3,6	94
4,8	282	0,28	3,8	100
5,1	293	0,27	3,8	107
8,5	197	0,16	2,3	108

Из данных приведенных в таблицах 2–5 следует, что диапазон тушащих концентраций ВВТ находится вблизи значения 100 г/м^3 , эта величина соответствует данным по тушению ВВТ приведенным в литературных источниках [11]. Тушащая концентрация ВВТ в пределах погрешности и условий эксперимента практически не зависит как от времени тушения или начала периодических изменений интенсивности горения при тушении пламени, следовательно, и от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Эти результаты подтверждают применимость сделанного ранее допущения, что до достижения предельной концентрации ВВТ (для данного расхода ВВТ) концентрация ВВТ может быть описана линейной зависимостью от времени подачи ВВТ.

Полученный вывод не противоречит тому обстоятельству, что более мощные источники горения тушатся ВВТ за более короткое время [12], т. к. в настоящем исследовании тепловая мощность источника пламени определялась при свободном горении без подачи ВВТ.

Для газовой горелки без фитиля (табл. 1, источник № 4), при достижении ВВТ тушащей концентрации, температура пламени снижается до температуры потухания и процесс тушения на этом заканчивается.

В автоколебательной системе должен присутствовать источник энергии и механизм обратной связи, который управляет источником энергии. Источник энергии получает колебательные свойства под воздействием механизма обратной связи, т. е. совокупности физико-химических процессов, происходящих в зоне горения, приводящих к периодическому изменению в выделении энергии.

В нашем случае колебательная система — это испытательная камера с источниками пламени и ВВТ, источник энергии —

источник пламени. Рассмотрим возможные механизмы обратной связи.

Достижение интегральной концентрации ВВТ диапазона тушащих концентраций в объеме испытательной камеры приводит к снижению интенсивности горения, в основном за счет разбавления кислорода воздуха и охлаждения зоны горения, которое, в свою очередь, ведет к уменьшению количества ВВТ, поступающего в зону горения за счет конвективной колонки нагретых продуктов горения. Кроме того, снижение интенсивности горения приводит к уменьшению поступления горючего для парафиновой свечи и спиртовой горелки (табл. 1, источники № 1, 2), так как в указанных случаях жидкое/расплавленное горючее поступает по фитилю в зону горения за счет капиллярных сил.

Для источников пламени с фитилем раскаленный/тлеющий кончик фитиля выступает как вторичный источник зажигания, после того как температура пламени снижается до температуры потухания. Интенсивность горения при этом уменьшается до практического отсутствия пламенного горения, что минимизирует поступление ВВТ в зону горения, а это, в свою очередь приводит к последующему увеличению интенсивности горения.

Общепризнано, что диффузионное пламя — поверхность, на которой горючее в виде газа и кислород воздуха находятся в стехиометрическом отношении. Снижение поступления горючего приведет к тому, что пламя будет уменьшаться, а его фронт начнет перемещаться в сторону источника горючего газа, в нашем случае в сторону раскаленного/тлеющего кончика фитиля, пока не выполнится условие стехиометрии. В результате разбавления кислорода воздуха парами воды при воздействии ВВТ будет наблюдаться обратная картина, и поверхность пламени должна увеличиваться. Отклонение пламени от стехиометрической поверхности приводит

к тому, что скорость горения уменьшается и будет опять максимальной, когда пламя достигнет нового стехиометрического положения, для этого необходимо определенное время – время запаздывания.

В рассматриваемом случае обратная связь может быть описана следующим образом. Снижение интенсивности горения с ростом концентрации ВВТ → уменьшение скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения → прекращение пламенного горения и снижение до минимума скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения → воспламенение горючих газов, находящихся в зоне горения от тлеющего/раскаленного кончика фитиля → увеличение интенсивности горения → увеличение поступления горючего и/или ВВТ в зону горения. Так как эти процессы не являются полностью согласованными друг с другом, появляется некоторое запаздывание между ними. Следовательно, процесс тепловыделения при горении становится периодическим и возникает возможность самовозбуждения колебаний пламени.

Таким образом, изменение скорости горения под воздействием ВВТ обуславливает периодические изменения, как скорости тепловыделения, так и скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения.

Исходя из вышеизложенного, в первые обнаруженные в настоящем исследовании длительные долгопериодические автоколебательные процессы при тушении пламени могут реализовываться по расходному (по горючему для источников № 1, 2) и/или диффузионному (по кислороду воздуха и ВВТ для источников № 1, 2, 3) механизмам обратной связи. Наличие или преобладание того или иного механизма обратной связи вероятно и обуславливает существенные различия в периодичности колебаний, наблюдаемые при тушении различных источников пламени.

Полученные результаты имеют и несомненное практическое значение, так из них следует, что при объемном пожаротушении требуется максимальная интенсивность подачи ВВТ это минимизирует эффект старения ВВТ, уменьшает время тушения и общий расход воды, предотвращает возникновение и развитие колебаний пламени. Для достижения гарантированного тушения низкокалорийных и тлеющих очагов горения необходимо превысить тушащую концентрацию ВВТ и еще некоторое время поддерживать ее в объеме объекта тушения.

Настоящее исследование может послужить основой для постановки в дальнейшем более обширных и детальных экспериментов при вариации свойств ВВТ и источников горения.

Выводы

Из проведенного анализа технологий распыления воды для объемного пожаротушения сделан вывод об актуальности проведения научно-исследовательских работ, направленных на исследование объемного пожаротушения ВВТ, образуемого ультразвуковым генератором.

Для исследования тушения пламени ВВТ был создан испытательный стенд, с помощью которого проведены эксперименты по определению характеристик тушения.

В ходе экспериментов было установлено, что для всех источников пламени, в которых использовались фитили, перед полным прекращением горения наблюдались долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения. Обнаруженные колебания интенсивности горения относятся к автоколебательным процессам и ранее не были описаны в научных источниках.

Проведено экспериментальное определение времени тушения или времени начала периодических изменений интенсивности горения при различных

расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. При увеличении расхода ВВТ время тушения или время начала периодических изменений интенсивности горения закономерно уменьшается.

По результатам исследования определены значения тушащей концентрации ВВТ, которая в рамках эксперимента практически не зависит как от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Проведен анализ возможных механизмов обратной связи в обнаруженных автоколебательных процессах, на основании чего сделан вывод о влиянии типа и механизма обратной связи на периодичность этих процессов.

Из полученных результатов следует, что при объемном пожаротушении требуется максимальная интенсивность подачи ВВТ это минимизирует эффект старения ВВТ, уменьшает время тушения и общий расход воды, предотвращает возникновение и развитие колебаний пламени. Для достижения гарантированного тушения низкокалорийных и тлеющих очагов горения необходимо превысить тушащую концентрацию ВВТ и еще некоторое время поддерживать ее в объеме объекта тушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Сверхзвуковое распыление воды для объемного пожаротушения // Техносферная безопасность. 2023. № 2 (39). С. 58–71.
2. Коровина Н. В. Создание аэрозольных сред с помощью автономных распылительных устройств, их эволюция и распространение в замкнутых объемах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Бийск, 2014. 120 с.
3. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 3. С. 60–69.
4. Murugan, S. S., Vijayakumar, P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // Archives of Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 83(2). pp. 74–78. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317234436> (date of application: 09.10.2023).
5. Мальгин Ю. В. Увлажнение воздуха туманом (теория и практика на примере ультразвукового увлажнителя) // С.О.К. 2007. № 10. С. 91–98.
6. Lozano, A., García, J., Alconchel, J. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization // ILASS2017. Sep. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/319509206> (date of application: 09.10.2023).
7. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равдель, А. М. Пономарева. Л., 1983. 232 с.
8. Ларионов В. М., Зарипов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань, 2003. 278 с.
9. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
10. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. М., 1988. Т. 1. 704 с.
11. Awtry, A. et al. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments // Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico May 4 – 6, 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228726107> (date of application: 09.10.2023).
12. Zhu, D., Liang, D., Liu, J. Numerical Simulation of Ultra-fine Water Mist Extinguishing Mechanism // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. pp. 28–33. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814004238> (date of application: 09.10.2023).

REFERENCES

1. Pakhomov G.B., Elfimova M.V., Tuzhikov E.N. Supersonic water atomization for volumetric fire extinguishing. Technospheric safety. 2023; 2(39):58–71. URL: [https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%20%20\(39\)/6.pdf](https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%20%20(39)/6.pdf). (rus).
2. Korovina N.V. Creation of aerosol environments by means of autonomous atomizing devices, their evolution and distribution in closed volumes. Diss. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Biysk, 2014; 120.

URL: <https://www.dissercat.com/content/sozдание-aerazolnykh-sred-s-pomoshchyu-avtonomnykh-raspylitelnykh-ustroystv-ikh-evolyutsiya>. (rus).

3. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N., Segal M.D. Features of fire extinguishing in a closed volume with thinly sprayed water. *Fire and explosion safety*. 2017; 3:60–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28949554>. (rus).

4. Murugan S.S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2017; 83(2): 74–78. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317234436>.

5. Malgin Yu.V. Air humidification by fog (theory and practice on the example of an ultrasonic humidifier). *S.O.K.* 2007; 10:91–98. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/uvlazhnenie-vozdusha-tumanom-teoriya-i-praktika-na-primere-ul-trazvukovogo-uvlazhnitelya>. (rus).

6. Lozano A., García J., Alconchel J. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization. *ILASS2017*. Sep. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/319509206>.

7. Brief reference book of physic-chemical quantities / Edited by A. A. Ravdel, A. M. Ponomarev. *Chemistry*, 1983; 232. (rus).

8. Larionov V.M., Zaripov R.G. Gas auto oscillations in combustion plants. *Kazan*, 2003; 278 (rus).

9. Malgin Yu.V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier. *S.O.K.* 2020; 3:56–59. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/energetika-i-dispersnost-tumana-obrazovannogo-ultrazvukovym-uvlazhnitelem>. (rus).

10. *Physical Encyclopedia* / Ed. by A. M. Prokhorov. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1988; 1: 704. (rus).

11. Awtry A. et al. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments. *Halon Options Technical Working Conference*, Albuquerque, New Mexico, May 4 – 6, 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228726107>.

12. Zhu D., Liang D., Liu J. Numerical Simulation of Ultra-fine Water Mist Extinguishing Mechanism. *Procedia Engineering*. 2014; 71: 28–33. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814004238>.

Информация об авторах

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

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

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

Information about the authors

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

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

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

УДК 614.835.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕКОТОРЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Гужва Александра Артуровна¹, Скрипник Игорь Леонидович¹,
Каверзнева Татьяна Тимофеевна², Румянцева Нина Вячеславовна²

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен способ снижения пожаровзрывоопасных проявлений нефтепродуктов (НП) при их хранении, транспортировке и сливо-наливных операциях. Способ представляет собой добавление модифицирующей присадки в среду НП при возникновении аварийных ситуаций (АС) в технологических процессах. В качестве модифицирующей присадки использованы углеродные многослойные нанотрубки и дополнительно стабилизированы электрофизическим воздействием. НП, модифицированные наночастицами, полученные в условиях электрофизического воздействия, характеризуются стабильностью наноструктур в среде НП, а также пониженной электропроводностью и парообразованием. Помимо улучшенных электростатических свойств, процесс агрегации наночастиц замедляется при воздействии переменного частотно-модулированного сигнала (ПЧМС), что способствует увеличению удельного электрического сопротивления модифицированных НП. Результаты исследования показывают снижение пожароопасных проявлений: интенсивности испарения и электризации НП, что предполагает снижение образования паровоздушных смесей, способных к воспламенению, и возможности образования потенциальных источников зажигания электростатической природы. Данные результаты свидетельствуют о возможности применения наноконструктивных компонентов в области обеспечения пожарной безопасности за счет управления параметрами обращающихся веществ и материалов.

Ключевые слова: нефтепродукты, углеродные наноструктуры, аварийные ситуации, паровоздушные смеси, электризация

STUDY OF FIRE HAZARDOUS PARAMETERS OF SOME PETROLEUM PRODUCTS UNDER CONDITIONS OF MODIFICATION AND STABILIZATION OF CARBON NANOPARTICLES

Alexandra A. Guzhva¹, Igor L. Skripnik¹, Tatyana T. Kaverzneva², Nina V. Rumyantseva²

¹ St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

This paper presents a method for reducing fire and explosion hazards of petroleum products (OP) during their storage, transportation and loading and unloading operations. The method involves adding a modifying additive to the NP medium in the event of emergency situations (AS) in technological processes. Multiwalled carbon nanotubes were used as a modifying additive and were additionally stabilized by electrophysical action. NPs modified with nanoparticles, obtained under conditions of electrophysical influence, are characterized by stability of nanostructures in the NP environment, as well as reduced electrical conductivity and vaporization. In addition to improved electrostatic properties, the process of nanoparticle aggregation, which contributes to an increase in the electrical resistivity of modified NPs, slows down when exposed to an alternating frequency modulated signal (AFMS). The results of the study show a decrease in fire hazardous manifestations: the intensity of evaporation and electrification of the oil, which suggests a decrease in the formation of steam-air mixtures capable of ignition and the possibility of the formation of potential ignition sources of an electrostatic nature. These results indicate the possibility of using nanocomponents in the field of fire safety by controlling the parameters of circulating substances and materials.

Keywords: petroleum products, carbon nanostructures, emergency, steam-air mixtures, electrification

Введение

В технологическом процессе производства на предприятиях нефтяного комплекса обращается большое количество НП, которые при наличии источника зажигания (фрикционной искры, разрядов статического электричества и т. д.) и окислителя могут приводить к чрезвычайным ситуациям (ЧС), проявляющимся в виде пожара, взрыва, что приводит к остановке производства, гибели обслуживающего персонала, в том числе людей, находящихся в селитебной зоне, потере материальных носителей (ценностей), а также нанесению большого вреда экологической обстановке в регионе [1–5].

Сами пожароопасные свойства НП, исходя из их физической и химической природы, устранить невозможно. Также не представляется возможным из технологического процесса изъять некоторые операции, такие как слив, налив НП, перекачка их по трубопроводам, транспортировка на другие объекты, хранение в специальных емкостях (резервуарах). Но возможно

предложить способы, позволяющие минимизировать пожароопасные свойства НП, для снижения возникновения АС. Это можно сделать с помощью модификации (внедрения) в НП углеродных наноструктур (УНС) и получения так называемых модифицированных наножидкостей (МНЖ) [6]. В связи с тем что снижение пожароопасных свойств в этом случае достигается непродолжительное время, также предлагается его увеличение с помощью воздействия на уже МНЖ электрофизическим способом с помощью подачи на них переменного частотно-модулированного сигнала (ПЧМС). Электрофизическое воздействие позволяет проводить данные необходимые операции технологического процесса с меньшей вероятностью возникновения ЧС при наличии соблюдения всех организационно-технических и компенсирующих мероприятий [7, 8].

Свойства НП, рассматриваемые в исследовании, определяют взрывопожароопасные параметры технологических

процессов и производств, то есть способность данных веществ к возникновению и распространению пожара [9, 10].

Интенсивность испарения рассматривается как параметр, определяющий возможность образования газопаровоздушных смесей, способных к воспламенению. Следовательно, при минимизации интенсивности парообразования снижается вероятность возникновения аварии, связанной с выбросом вещества в окружающую среду.

Также важным параметром следует учитывать возникновение потенциальных источников зажигания, одним из немаловажных является электростатика. На сегодняшний день известные организационные мероприятия и технические средства электростатической искробезопасности при обращении НП не способны в полном объеме минимизировать образование электростатических разрядов. Поскольку электрическая проводимость НП характеризуется свойствами присадок и примесей, рассматриваемые электрофизические свойства НП, такие как электрическая проводимость и напряженность электрического поля, отражают способность веществ к накоплению электростатических разрядов. Следовательно, при увеличении электропроводности и снижении электризации снижается вероятность возникновения электростатического источника зажигания при обращении НП.

Методология

Объекты исследования представляют собой свойства наножидкостей на основе НП в условиях электрофизической стабилизации [4]. В качестве базовых жидкостей НП использовался керосин ТС-1, авиационный, автомобильный бензин АИ-95. УНС – MWCNT, подготовленные на установке «CVDompa». Стабилизация УНС производилась путем электрофизиче-

ской стабилизации с помощью применения прибора ПЧМС [4]. Для оценки эффективности применения выбранного нами метода стабилизации проводились исследования и для нестабилизированных наножидкостей.

Методом исследования интенсивности испарения НП, модифицированных УНС в условиях электрофизической стабилизации, является гравиметрия испарившейся МНЖ, находящейся в стеклянной колбе с открытой крышкой. После 1 суток, проведенных исследований, на весах фиксировалась потеря ее массы. Расчет интенсивности испарения производился согласно ГОСТ ISO 4589-84.

Путем фиксации изменения напряженности электрического поля, при воздействии источника ультразвука, проводились измерения напряженности электрического поля модифицированных НП в условиях электрофизической стабилизации УНС. Применялся источник ультразвука с параметрами $f = 100$ кГц, $P = 1$ кВт, фиксация измерений производилась электростатическим вольтметром «SF 156», расстояние от поверхности жидкости 50 мм, образец представляет собой НП, помещенный в стеклянные емкости объемом 50 мл.

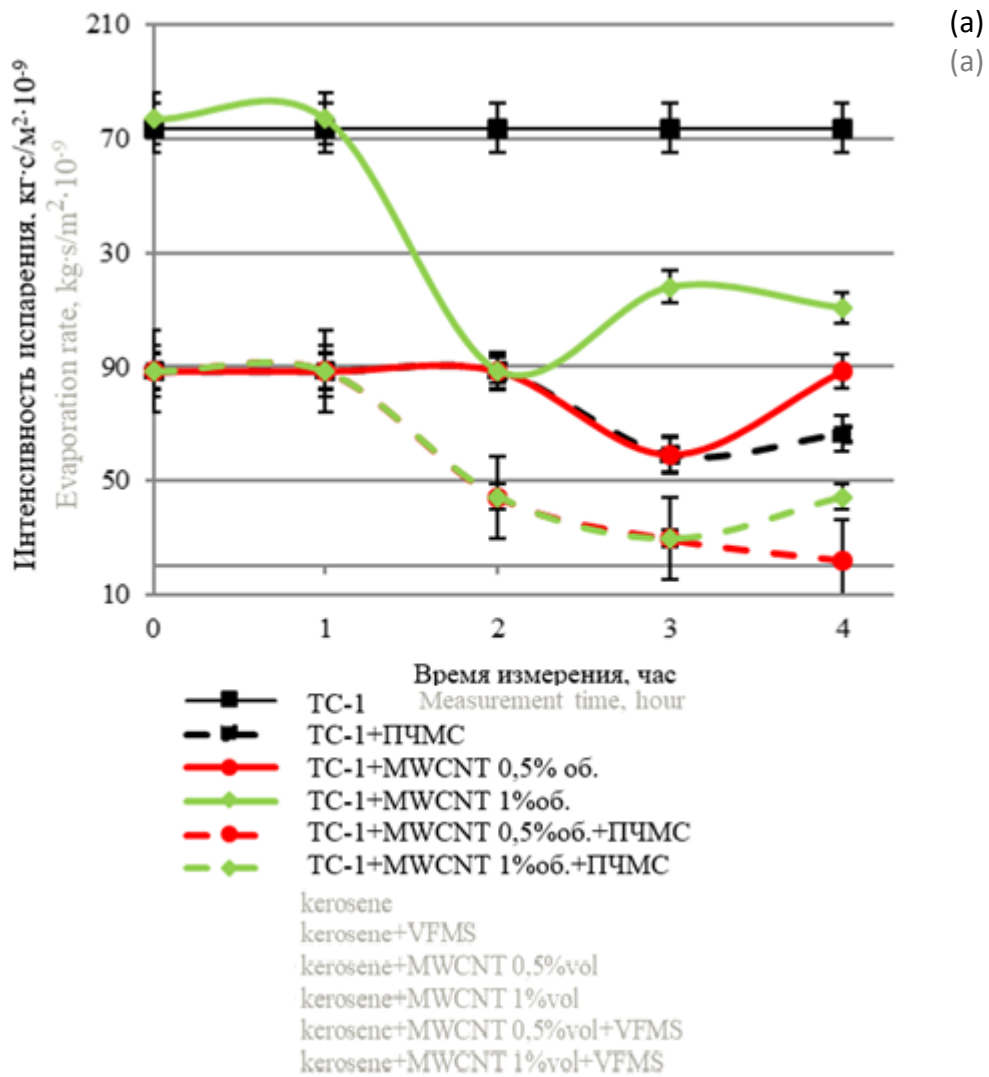
Согласно ГОСТ ISO 6297-2015С, с помощью терраметра Е6-13А осуществлялись измерения удельной электрической проводимости. Снятие результатов измерений выполнялось с интервалом в 30 мин за 4 часа до установления термодинамического и статического равновесия заряда МНЖ при электрофизическом воздействии.

Результаты и их обсуждение

Данные исследования процессов парообразования модифицированных MWCNT НП в условиях электрофизической стабилизации УНС показывают снижение значений интенсивности испарения

на 32 ÷ 38 % по отношению к модифицированным MWCNT НП, не подверженным каким-либо способам стабилизации УНС, взятым за объект сравнения. Показаны

результаты опытов воздействия ПЧМС на МНЖ по изменению интенсивности испарения (рис. 1).



(a)
(a)

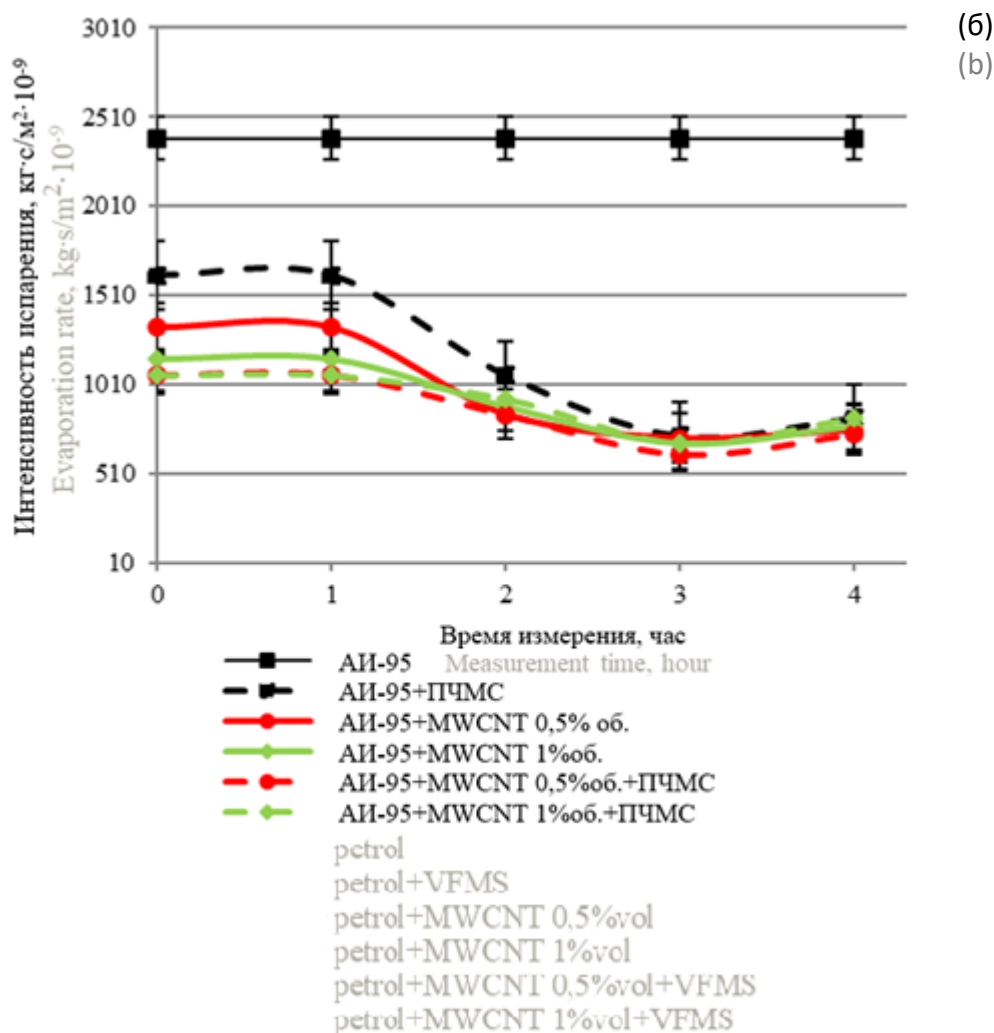


Рис. 1. Интенсивность испарения модифицированных MWCNT НП в условиях воздействия ПЧМС (а) ТС-1, (б) АИ-95

Fig. 1. The evaporation rate of modified MWCNT petroleum products in conditions of variable frequency-modulated signal of (a) kerosene, (b) petrol

Видно, что данное влияние имеет позитивный характер, т. к. исследуемая характеристика уменьшилась приблизительно на 23 ÷ 41 %.

Снижение интенсивности паробразования связано с увеличением времени образования агрегатов УНС вследствие воздействия ПЧМС. Таким образом, применение стабилизированных наножидкостей позволит «управлять» процессами образования горючих смесей вследствие выхода НП в окружающую среду при возникновении АС [20].

При концентрации MWCNT 0,5 % об. значения интенсивности образования паровоздушных смесей минимально по сравнению с концентрацией 1,0 % об., что обусловлено медленной агрегацией наночастиц.

Результаты исследования процессов электризации модифицированных НП в условиях стабилизации УНС показывают снижение напряженности электрического поля, стабилизированных наножидкостей на 61 ÷ 69%. по отношению к МНЖ без воздействия ПЧМС (рис. 2)

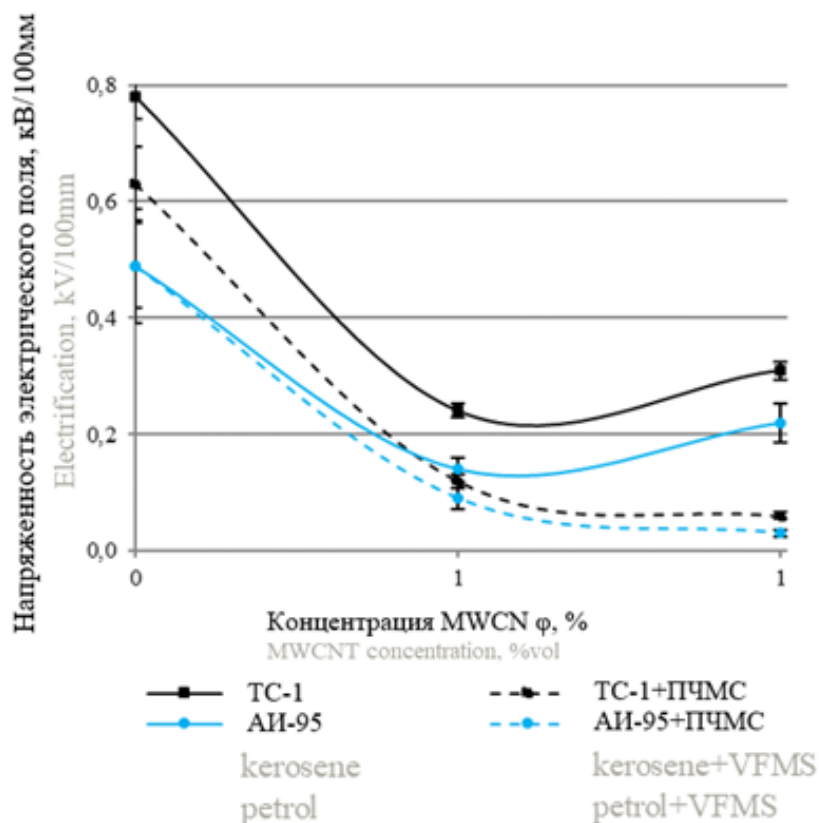


Рис. 2. Напряженность электрического поля модифицированных MWCNT НП в условиях воздействия ПЧМС

Fig. 2. Dependence of electrification of modified petroleum products in conditions variable frequency-modulated signal of MWCNT concentration

Электрофизические свойства жидкостей зависят во многом от характеристик присадок, в данном случае от свойств УНС, которые проявляют индуцированную поляризацию. Следовательно, для оценки вклада стабильности УНС в среде НП проведены исследования удельного объемного электрического сопротивления

(УОЭС) полученных наножидкостей на основе НП.

Результаты исследования УОЭС при электрофизической стабилизации наноструктур показывают уменьшение приблизительно на 32 ÷ 59 %. В то же время по отношению к МНЖ без электрофизического воздействия стабильность данного показателя выросла до 4 часов (рис. 3).

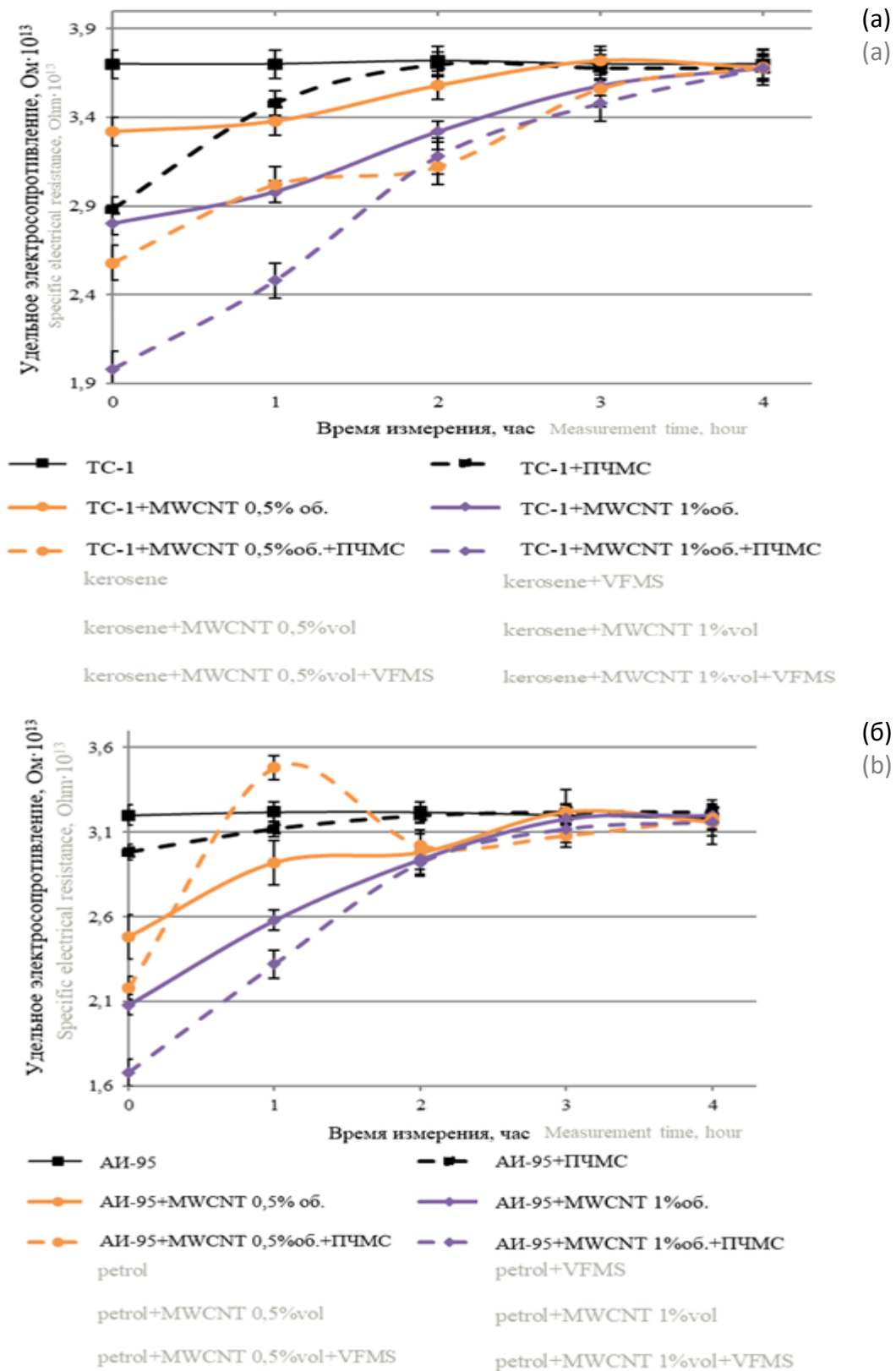


Рис. 3. УОЭС модифицированных MWCNT НП в условиях воздействия ПЧМС ТС-1 (а), АИ-95 (б)

Fig. 3. The specific electrical resistance of modified MWCNT petroleum products in conditions of variable frequency-modulated signal of (a) kerosene, (b) petrol

Таким образом, в условиях электрофизической стабилизации MWCNT подвержены менее интенсивному процессу образования агрегатов. За счет стабильности наножидкостей в условиях воздействия электрического поля стабилизируются и значения электрической проводимости жидкостей.

Полученные результаты отражают возможность использования УНС в качестве присадок НП. При модификации НП УНС возможно управления свойствами пожароопасных жидкостей [6]. Результаты исследований, приведенные в данной работе, показывают перспективное использование наноматериалов в качестве присадок способных обратимо менять свойства НП. В совокупности с электрофизической стабилизацией возможно не только улучшить полученные результаты, а также увеличить время действия улучшенных свойств во времени, что позволит минимизировать вероятность возникновения АС.

Выводы

Применение наноструктурных присадок имеет место в случаях возникновения АС с целью минимизации проявлений, связанных с пожаровзрывоопасностью протекающих в производстве процессов: при операциях слива-налива НП (опорожнение и заполнение емкостей, приемка НП на сливо-наливных эстакадах и т. д.), хранения (резервуары для долгосрочного и краткосрочного хранения НП, малообъемные емкости и т. д.) и транспортировки (транспортировка по нефтепродуктопроводам, железнодорожным и автомобильным транспортом) [14–22].

Разработка технических средств и организационных мероприятий применения описанного способа снижения пожароопасных параметров технологических процессов при обращении НП, модифицированных УНС, в условиях электрофизического воздействия является направлением дальнейших исследований [14–22].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Условия стабилизации наноструктур для безопасной транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей / А. В. Иванов и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 9. С. 35–43.
2. Мифтахутдинова А. А., Иванов А. В., Ивахнюк Г. К. Моделирование процессов электризации жидких углеводородов в условиях стабилизации углеродных наноструктур // Техносферная безопасность. 2018. Т. 21, № 4. С. 36–44.
3. Мифтахутдинова А. А., Таранцев А. А., Ивахнюк Г. К. Моделирование процессов парообразования модифицированных нефтепродуктов в условиях стабилизации углеродных наноструктур // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 2. С. 113–117.
4. Реализация технологии управления свойствами наноструктур в жидких углеводородах для снижения пожарного риска на объектах нефтегазового комплекса / А. А. Мифтахутдинова и др. // Техносферная безопасность. 2019. Т. 23, № 2. С. 49–57.
5. Физико-технологические принципы и методика управления пожароопасными процессами при обращении с жидкими углеводородами в условиях стабилизации углеродных наноструктур / А. В. Иванов и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27, № 12. С. 7–18.
6. Технология управления наноструктурами для снижения пожарной опасности в нефтегазовой отрасли: эффективность, особенности и реализация / А. В. Иванов и др. // Журнал прикладной инженерной науки. 2021. Т. 766. № 19. С. 84–91.
7. Исследование интенсивности теплового потока при компостировании органических отходов / Г. К. Ивахнюк и др. // Конф. ЮР. Серия: Наука о Земле и окружающей среде. 2020. Т. 548. С. 1–6.
8. Оценка технического уровня новых, перспективных образцов техники на этапе их разработки в современной инженерной практике / И. Л. Скрипник и др. // Конф. ЮР. Серия: Материаловедение и инженерия. 2020. Т. 862. С. 1–8.
9. Вагапов Р. Р., Родионов В. А. Новые возможности повышения огнетушащих свойств воды и водных растворов ПАВ // Нефтяное хозяйство. Нефтяная промышленность. 2010. № 11. С. 123–125.

10. Экспресс-биоиндикация загрязнения окружающей среды ртутью с использованием дрожжевых грибов / Е. А. Новоселова и др. // IOP Conf. WIAFT-V-2021 Серия: Наука о Земле и окружающей среде. 2021. Т. 848. С. 1-6.
11. Метод исследования влияния ингибирующих и флегматизирующих веществ на воспламеняемость и взрывоопасность угольной пыли / З. А. Абиев и др. // МИАБ. Горное дело. 2018. Вып. 5. С. 26–34.
12. Совершенствование метода экспресс-биоиндикации дрожжевыми грибами загрязнения окружающей среды ртутью с использованием механической активации и электрофизического воздействия / Е. А. Новоселова и др. // IOP Conf. AGRITECH-V-2021 Серия: Наука о Земле и окружающей среде. 2021. Т. 839. С. 1-7.
13. Жихарев С. Я., Родионов В. А., Пихконен Л. В. Инновационные методы исследования технологических свойств и данных о взрывопожароопасности угольной пыли // Горный журнал. 2018. № 6. С. 45–49.
14. Akoh H., Tsukasaki Y., Yatsuya S., Tasaki A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 45 (1978), pp. 495–500.
15. Baby T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 12 (2010), pp. 124–308.
16. Bhunia M. M., Panigrahi K., Das S., Chattopadhyay K.K., Chattopadhyay P. Amorphous graphene – Transformer oil nanofluids with superior thermal and insulating properties. *Carbon*, 139 (2018), pp. 1010–1019.
17. Sidik N. A. C., Jamil M. M., Arif W. M. Aziz Japar, Adamu I. M. A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80 (2017), pp. 1112–1122.
18. Tzallas P., Kosmidis C., Philis J. G. Ionization/dissociation of thiazole and thiazolidine induced by strong laser fields. *Chemical Physics Letters*, 343 (2001), pp. 91–98.
19. Nasiri A., Shariaty-Niasar M., Rashidi A., Amrollahi A., Khodafarin R. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. *Experimental thermal and fluid science*, 4 (2011), pp. 717–723.
20. Shaik S., de Visser S. P., Kumar D. External Electric Field Will Control the Selectivity of Enzymatic-Like Bond Activations. *JACS Articles*, 126 (2004), pp. 11746–11749.
21. Mebel A. M., Zyubina T. S., Dyakov Y. A., Bandrauk A. D., Lin S. H. Potential energy surfaces in coulomb explosion of polyatomic molecules: benzene and cyclohexane trications and acetylene dication. *International Journal of Quantum Chemistry*, 102 (2005), pp. 506–519.
22. Mukherjee S., Paria S. Preparation and Stability of Nanofluids. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2 (2013), pp. 63–69.

REFERENCES

1. Ivanov A.V., Miftakhutdinova A.A., Nefed'ev S.A., Simonova M.A., Maslakov M.D. Conditions for stabilization of nanostructures for the safe transportation of flammable liquids. *Fire and Explosion Safety*, 2017; 26(9): 35–43. (rus).
2. Miftakhutdinova A.A., Ivanov A.V., Ivakhnyuk G.K. Modeling of processes of electrification of liquid hydrocarbons under conditions of stabilization of carbon nanostructures. *Technosphere safety*. 2018; 21(4):36–44. (rus).
3. Miftakhutdinova A.A., Tarantsev A.A., Ivakhnyuk G.K. Modeling of vaporization processes of modified petroleum products under conditions of stabilization of carbon nanostructures. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2019; 2:113–117. (rus).
4. Miftakhutdinova A.A., Ivanov A.V., Skripnik I.L., Shugaibov R.A. Implementation of technology for controlling the properties of nanostructures in liquid hydrocarbons to reduce fire risk at oil and gas complex facilities. *Technospheric safety*. 2019; 23(2):49–57. (rus).
5. Ivanov A.V., Miftakhutdinova A.A., Ivakhnyuk G.K., Basharichev A.V. Physico-technological principles and methods for controlling fire-hazardous processes when handling liquid hydrocarbons under conditions of stabilization of carbon nanostructures. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2018; 27(12):7–18. (rus).
6. Ivanov A.V., Dali F.A., Ivakhnyuk G.K., Skripnik I.L., Simonova M.A., Shikhalev D.V. Nanostructure control technology to reduce fire danger in the oil and gas industry: efficiency, features and implementation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; 766(19):84-91. (rus).
7. Ivakhnyuk G.K., Skripnik I.L., Ksenofontov Yu.G., Kaverzneva T.T., Basharichev A.V. Study of heat flow intensity during composting of organic waste. *Conf. IOP. Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548:1–6. (rus).

8. Skripnik I.L., Ksenofontov Yu.G., Kaverzneva T.T., Rummyantseva N.V., Kiss V.V. Assessment of the technical level of new, promising models of equipment at the stage of their development in modern engineering practice. Conf. IOP. Series: Materials Science and Engineering. 2020; 862: 1–8. (rus).
9. Vagapov R.R., Rodionov V.A. New possibilities for increasing the fire extinguishing properties of water and aqueous solutions of surfactants. Oil industry. Oil industry. 2010; 11:123–125. (rus).
10. Novoselova E.A., I.L. Skripnik, T.T. Kaverzneva, D.I. Idrisova, K.V. Wheat. Express bioindication of environmental pollution with mercury using yeast fungi. IOP Conf. WIAFT-V-2021 Series: Earth and Environmental Science. 2021; 848:1–6. (rus).
11. Abiev Z.A., Rodionov V.A., Paramonov G.P., Chernobay V.I. Method for studying the influence of inhibitory and phlegmatizing substances on the flammability and explosion hazard of coal dust. MIAB. Mining engineering. 2018; 5:26–34. (rus).
12. Novoselova E.A., Skripnik I.L., Kaverzneva T.T., Rummyantseva N.V., Tumanov A.Yu. Improving the method of express bioindication of environmental mercury pollution by yeast fungi using mechanical activation and electrophysical influence. IOP Conf. AGRITECH-V-2021 Series: Earth and Environmental Science. 2021; 839:1–7. (rus).
13. Zhikharev S.Ya., Rodionov V.A., Pikhkonen L.V. Innovative methods for studying technological properties and data on the explosion and fire hazard of coal dust. Mining Journal. 2018; 6:45–49. (rus).
14. Akoh H., Tsukasaki Y., Yatsuya S., Tasaki A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. Journal of Crystal Growth, 45 (1978), pp. 495-500.
15. Baby T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids. Journal of Applied Physics. 2010; 12:124–308.
16. Bhunia M.M., Panigrahi K., Das S., Chattopadhyay K.K., Chattopadhyay P. Amorphous graphene – Transformer oil nanofluids with superior thermal and insulating properties. Carbon, 2018; 139:1010–1019.
17. Sidik N.A.C., Jamil M.M., Arif W.M. Aziz Japar, Adamu I.M. A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 80:1112-1122.
18. Tzallas P., Kosmidis C., Philis J.G. Ionization/dissociation of thiazole and thiazolidine induced by strong laser fields. Chemical Physics Letters, 2001; 343:91-98.
19. Nasiri A., Shariaty-Niasar M., Rashidi A., Amrollahi A., Khodafarin R. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. Experimental thermal and fluid science. 2011; 4:717–723.
20. Shaik S., de Visser S.P., Kumar D. External Electric Field Will Control the Selectivity of Enzymatic-Like Bond Activations. JACS Articles, 2004; 126:11746–11749.
21. Mebel A.M., Zyubina T.S., Dyakov Y.A., Bandrauk A.D., Lin S.H. Potential energy surfaces in coulomb explosion of polyatomic molecules: benzene and cyclohexane trications and acetylene dication. International Journal of Quantum Chemistry. 2005; 102:506–519.
23. Mukherjee S., Paria S. Preparation and Stability of Nanofluids. Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013; 2:63–69.

Информация об авторах

Гужва Александра Артуровна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Россия, 193079, Россия, Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35; РИНЦ ID: 974754; Scopus Author ID: 58166095000; ORCID: 0000-0003-3746-4135; e-mail: mif-afto@mail.ru

Скрипник Игорь Леонидович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств,

Information about the authors

Alexandra A. Guzhva, Candidate of Technical Sciences, Researcher, St. Petersburg University State Fire Service EMERCOM of Russia, Oktyabrskaya embankment, 35, St. Petersburg, 193079, Russian Federation; RSCI ID: 974754; Scopus Author ID: 58166095000; ORCID: 0000-0003-3746-4135; e-mail: mif-afto@mail.ru

Igor L. Skripnik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Fire Safety of Tech-

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Россия, 193079, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149; РИНЦ ID: 970943; Scopus Author ID: 57210910552; ORCID: 0000-0001-6319-5413; e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru

Каверзнева Татьяна Тимофеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29; РИНЦ ID: 704170; Scopus Author ID: 6507592108; ResearcherID: P-5020-2015; ORCID: 0000-0002-7423-4892; e-mail: kaverztt@mail.ru

Румянцева Нина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29; РИНЦ ID: 536365; Scopus Author ID: 57210920516; ResearcherID: L-6450-2018; ORCID: 0000-0001-5045-6282; e-mail: rumyantseva_nina@mail.ru

nological Processes and Production, St. Petersburg State Fire Service University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; RSCI ID: 970943; Scopus Author ID: 57210910552; ORCID: 0000-0001-6319-5413; e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru

Tatyana T. Kaverzneva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya st., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; RSCI ID: 704170; Scopus Author ID: 6507592108; ResearcherID: P-5020-2015; ORCID: 0000-0002-7423-4892; e-mail: kaverztt@mail.ru

Nina V. Rumyantseva, candidate of technical sciences, associate professor, Associate Professor, Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya st., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; RSCI ID: 536365; Scopus Author ID: 57210920516; ResearcherID: L-6450-2018; ORCID: 0000-0001-5045-6282; e-mail: rumyantseva_nina@mail.ru

УДК 656.9

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕГРЕВА И ВОЗГОРАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**Сачков Игорь Николаевич¹, Куанышев Валерий Таукенович²,
Кобелев Антон Михайлович³**¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия²Уральский технический институт связи и информатики, г. Екатеринбург, Россия³Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия**АННОТАЦИЯ**

Известно, что перегревы электрических контактов являются одной из важнейших причин возникновения пожаров. Традиционный анализ нагрева контакта предусматривает, что его источником является переходное электрическое сопротивление. При этом не рассматривается микроструктура области контакта. Между тем в реальности любой контакт твердых поверхностей осуществляется через посредство отдельных микроконтактов. В предлагаемой работе созданы компьютерные программы, описывающие процессы перегрева микроконтактов электрических контактов. Специализированные программы основаны на использовании метода конечных элементов и реализованы в кодах Фортрана. Рассмотрены идеализированные системы, содержащие регулярно расположенные контактные площадки, в пределах которых выделяется Джоулево тепло. Рассматривается нагрев элементарной ячейки. Используется дискретизация двумерного осесимметричного пространства треугольными симплекс-элементами. Используется прямоугольная расчетная область. Применяются граничные условия первого и второго рода, а также адиабатические границы. Рассматриваются стационарные процессы. Проведенные компьютерные эксперименты показали, что в области микроконтактов температура нагрева превышает средние по поверхности контакта в десятки раз. Обсуждается влияние перегревов на возникновение пожарной опасности. Рассматриваются также процессы возникновения окисной пленки, вызывающей изоляцию отдельных микроконтактов. Предлагается использовать представленные алгоритмы для прогнозирования отказов электрических контактов при построении дерева событий возникновения пожара. Рассматриваются перспективы дальнейшего развития физико-химической модели деградации электрических контактов.

Ключевые слова: электрические контакты, возгорание, электрический нагрев, пожар, микроконтакты

DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAMS FOR PREDICTING OVERHEATING AND FIRE OF ELECTRICAL CONTACTS**Sachkov Igor N.¹, Kuanyshev Valery T.², Kobelev Anton M.³**¹Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation²Ural Technical Institute of Communications and Informatics, Ekaterinburg, Russian Federation

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

ABSTRACT

It is known that overheating of electrical contacts is one of the most important causes of fires. Traditional analysis of contact heating assumes that its source is transient electrical resistance. In this case, the microstructure of the contact area is not considered. Meanwhile, in reality, any contact of solid surfaces is carried out through individual microcontacts. In the proposed work, computer programs have been created that describe the processes of overheating of microcontacts of electrical contacts. Specialized programs are based on the use of the finite element method and are implemented in Fortran codes. Idealized systems containing regularly spaced contact pads within which Joule heat is generated are considered. The heating of a unit cell is considered. Discretization of two-dimensional axisymmetric space by triangular simplex elements is used. A rectangular computational domain is used. Boundary conditions of the first and second kind, as well as adiabatic boundaries, are applied. Stationary processes are considered. Computer experiments have shown that in the area of microcontacts, heating temperatures exceed the average over the contact surface by tens of times. The influence of overheating on the occurrence of fire danger is discussed. The processes of the formation of an oxide film, which causes the isolation of individual microcontacts, are also considered. It is proposed to use the presented algorithms to predict failures of electrical contacts and when constructing a tree of fire events. The prospects for further development of the physicochemical model of degradation of electrical contacts are considered.

Keywords: electrical contacts, fire, electrical heating, fire, microcontacts

Введение

Существующая статистика пожаров свидетельствует, что одной из основных причин возгорания электропроводки является плохой электрический контакт [1–4]. Высокое переходное сопротивление контактной пары является важнейшей причиной нагрева и повышает риск возникновения пожара в жилых помещениях и иных объектах. Математическое моделирование методом графов показало, что нагрев контакта инициирует окисление контактирующих поверхностей и далее приводит к еще большему ухудшению контакта [5].

Прогнозирование вероятности возникновения возгорания, связанного с перегревом электрических контактов, осуществляется путем построения дерева отказов [6–7]. При этом его численная ре-

ализация требует знания вероятности первичного воспламенения контакта. Между тем расчеты тепловых процессов в области контакта затрудняются следующим.

Малоизученными до настоящего времени остаются особенности нагрева микроконтактных точек. Необходимо учитывать, что электрический контакт осуществляется не по всей поверхности, а лишь через конечное число контактных пятен, в свою очередь состоящих из совокупности микроконтактных точек. Как известно [8–10], поверхность твердого тела не может быть абсолютно гладкой, и если контакты выполнены из идеально твердого материала, то соприкосновение происходит не более чем в трех точках. В реальности материал подвержен деформации, при этом точки сплющиваются и становятся маленькими поверхностями. Кроме того, необходимо учитывать, что

реальной поверхности твердого тела вообще присуще наличие неровностей. Даже скол по плоскости спайности любого монокристалла имеет выступы и впадины размерами до десятков и сотен ангстрем. Это могут быть ступеньки роста, точки выхода дислокаций и другие нарушения кристаллического строения. Поликристаллические же твердые тела характеризуются значительно большей неровностью рельефа.

Рис. 1 иллюстрирует особенности профиля поверхности контактного элемента. На схеме видны два типа неровностей: «волны» и «микровыступы». Эти микронеровности поверхности металла характеризуются следующими параметрами: высотой волны, имеющей размер H_1 от 20 до 40 мкм, и шагом волны L_1 от 10 до 200 мкм [9–10]. На волну накладываются выступы, характеризующиеся параметрами H_2 и L_2 менее 1 мкм.

При формировании как механического, так и электрического контакта, как правило, не может произойти такое сближение, при котором атомы одной поверхности соединяются с атомами другой,

образуя единое целое для прохождения тока. Основная причина этого состоит в том, что поверхности металлов, даже тщательно обработанные, имеют шероховатости, размер которых значительно превышает размер молекул и атомов металлов, а также в том, что в результате воздействия окружающей среды они никогда не бывают абсолютно чистыми. На поверхностях адсорбируются молекулы кислорода и других газов, металлы вступают во взаимодействие с газами окружающей среды (кислородом, парами воды, сернистыми газами) [11]. Таким образом, для возникновения электрического контакта необходимы продавливание адсорбированной пленки и взаимная деформация сближающихся выступов. При этом возникают микроконтакты, группы которых составляют пятна касания. На рис. 2 изображено формирование подобного микроконтакта (черная жирная линия). Его площадь тем выше, чем больше прижимающее усилие. При возникновении подобного пятна происходит стягивание и резкая концентрация линий электрического тока.

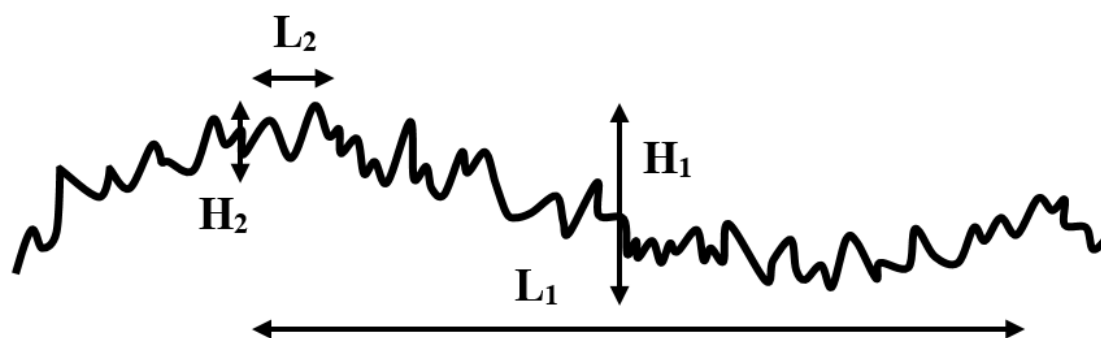


Рис. 1. Схема типичного профиля поверхности металла

Fig. 1. Diagram of a typical metal surface profile

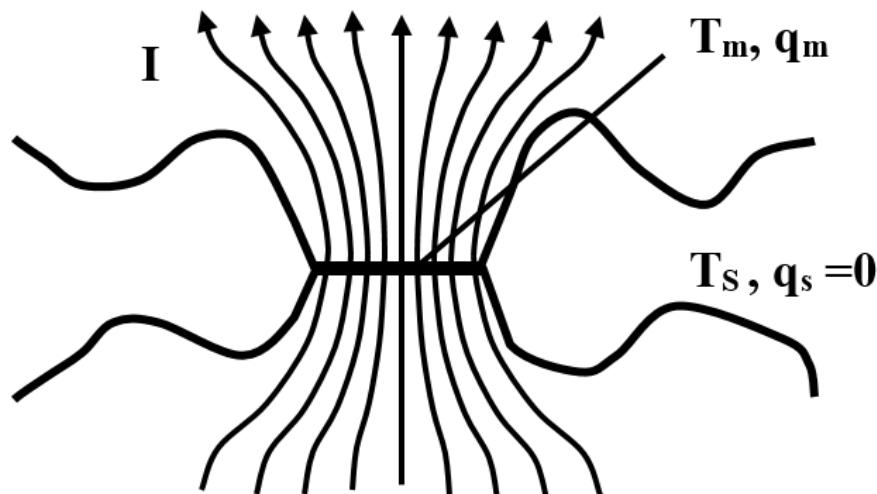


Рис. 2. Формирование микроконтакта: стрелки указывают направление линий электрического тока, черная линия – область металлического контакта

Rice. 2. Formation of a microcontact: the arrows indicate the direction of the electric current lines, the black line is the area of the metal contact

Здесь T_m и T_s – температура микроконтакта и средняя температура контактной поверхности, соответственно, q – плотность выделения Джоулева тепла, I – электрический ток.

Поверхность металлического контакта является главным источником электрического сопротивления всего контакта. При этом величиной контактного сопротивления можно считать сопротивление стягивания $R_{\text{конт}}$, которое является следствием стягивания (сужения) линий тока к маленькому проводящему пятну контакта. Области стягивания имеются на обоих контактных элементах. Р. Хольмом [8] впервые было установлено, что величина сопротивления стягивания равна.

$$R = \frac{\rho}{2a'}, \quad (1)$$

где a – радиус площадки контактирования; ρ – удельное сопротивление материала.

Анализ результатов существующих исследований, посвященных тепловым процессам в электрических контактах, показывает, что до настоящего времени остаются неизвестными пространственные распределения температуры в области

микроконтакта, а также значения температуры максимального локального перегрева T_m .

Известно, что электрический ток значительно концентрируется в области микроконтакта, характеризуемого температурой T_m (рис. 2). Сгущение линий тока приводит к формированию переходного электрического сопротивления [8, 12]. Кроме того, оказывается, что температура микроконтакта T_m значительно выше средней температуры поверхности контакта T_0 .

Анализ существующей литературы показал, что до настоящего времени остаются недостаточно изученными характер распределения температуры по поверхности контакта и значения соотношения T_m/T_0 . Между тем распределения температур являются важнейшим фактором деградации электрического контакта и, соответственно, его пожароопасности в течение всего срока службы. Цель настоящей работы состоит в создании компьютерных методик, позволяющих устанавливать обсуждаемые распределения температуры в области микроконтакта.

Методика расчетов

Рассмотрим контактную пару, характеризуемую в сечении простейшей прямоугольной формой, схема которой представлена на рис. 3 (а).

Известно, что основное электрическое сопротивление контактов создается поверхностью контакта, образуя «переходное электрическое сопротивление». Учтем, что оно оказывается основным источником нагрева электрического контакта, $T_m \gg T_c$ (рис. 3 (б)). Между тем особенности температурного поля на микроуровне остаются до настоящего времени недостаточно изученными. Неизвестными оказываются также и особенности распределения в области микроконтактов, в направлении, перпендикулярном направлению невозмущенного тока.

С целью выявления основных закономерностей обсуждаемого процесса осуществим следующую идеализацию проводящей системы.

1. Прежде всего положим, что микроконтакты имеют форму круглых площадок S_m , плоскости которых параллельны рабочей плоскости S .

2. Контактные области охарактеризуем одинаковым радиусом R_m .

3. Считаем, что центры микроконтактов расположены регулярно, образуя на поверхности S узлы гексагональной плотно упакованной решетки, с периодом L_c .

На рис. 4 (а) изображена схема части контактной поверхности для подобной идеализированной системы. Пунктирными линиями представлены границы гексагональных элементарных ячеек, совокупность которых образует рассматриваемое контактное тело. Микроконтакты выделены на рис. 4 серым цветом.

4. Заменяем далее шестигранные призмы цилиндрическими областями радиусом R_c (рис. 4 (б)), учитывая условие равенства объемов шестигранной и цилиндрической ячеек.

Далее введем цилиндрическую систему координат (r, y) , расположив ее начало в центре микроконтактной площадки (рис. 4 (б)).

5. Учтем, что Джоулево тепло, характеризуемое плотностью q_m , выделяется в заштрихованной области радиусом R_m (рис. 5) и распространяется далее по объему рассматриваемого цилиндра.

Установим граничные условия в соответствии с рис. 5. Линия, выделенная черным цветом ($y = 0, 0 \leq r \leq R_m$), соответствует ГУ 2-го рода, $q = q_m$. Серая линия, $y = H_c$, устанавливает ГУ 1-го рода, $T = T_c$. Пунктир отвечает условию равенства нулю потоку через границу, то есть условию зеркальной симметрии и адиабатичности, $q = 0$.

В принятой модели поток тепла создается микроконтактной площадкой и распространяется в глубину контактного тела, имеющего температуру T_c . То есть рассматриваются ситуации, при которых размер микровыступа много меньше толщины контактного тела.

Для расчета распределения температуры в пределах пространства (r, y) и ее величины T_m в центре микроконтакта (при $r = 0, y = 0$) применим метод конечных элементов (МКЭ) с дискретизацией пространства треугольными в сечении симплекс-элементами. Описываемый алгоритм был реализован в форме компьютерной программы в кодах Фортран. Подробное описание подобной программы было представлено ранее [13].

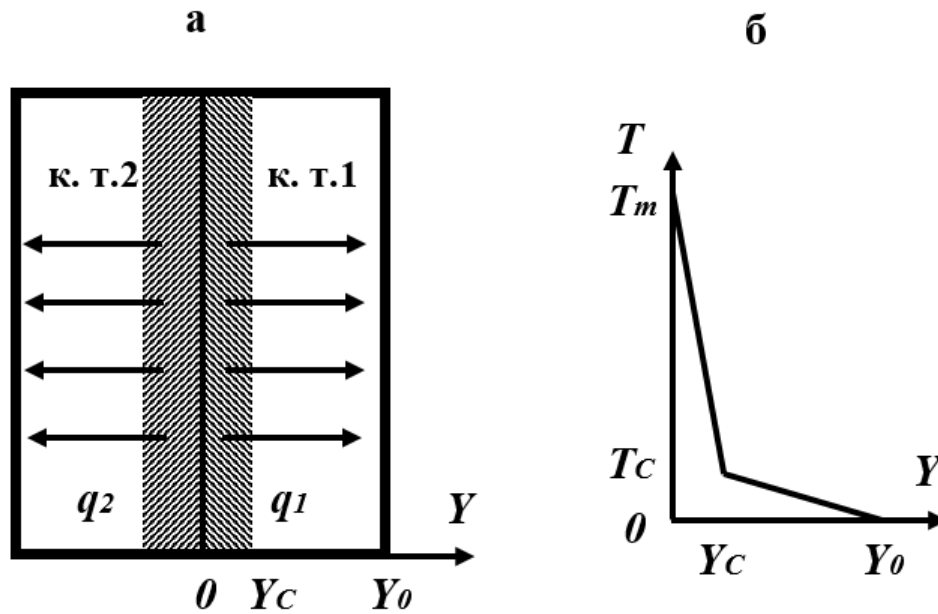


Рис. 3 Схема соединения двух контактных тел (а) и традиционно принятая схема изменения температуры, (б); заштрихованы области формирования переходного сопротивления, q – плотности потоков тепла, T – отклонение температуры от среднего
Rice. 3 Connection diagram of two contact bodies (a) and the traditionally accepted temperature change diagram, (b); the areas of transition resistance formation are shaded, q - the heat flux density, T - the temperature deviation from the average

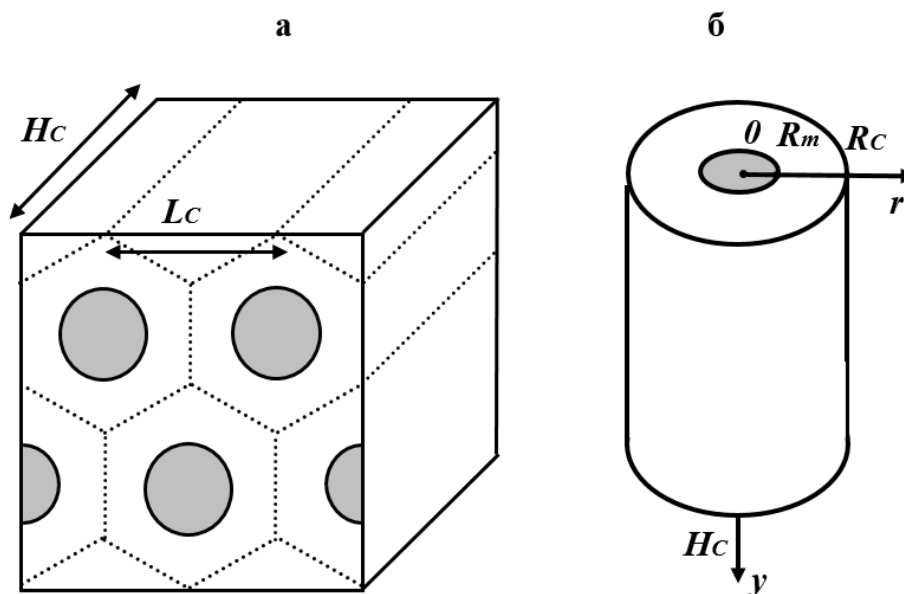


Рис. 4 Схема идеализации системы; а – регулярное расположение микроконтактов, б – схема цилиндрической расчетной области.
Rice. 4 System idealization scheme; a – regular arrangement of microcontacts, b – diagram of a cylindrical computational domain

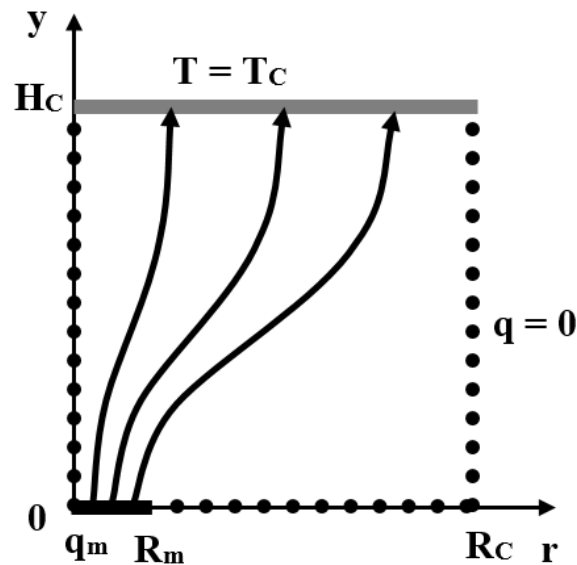


Рис. 5. Схема граничных условий расчетной области и линий распространения тепла.
Rice. 5. Scheme of boundary conditions of the computational domain and heat propagation lines

Результаты и их обсуждение

Описываемый алгоритм был реализован в форме программы на языке Фортран для ЭВМ, типа IBM PC. С ее помощью был проведен компьютерный эксперимент по исследованию геометрических особенностей температурных полей, реализующихся в окрестностях микроконтактов. Как правило, использовались сетки разбиений плотностью 200×200 элементов. Погрешности расчетов значений температуры оценивались с помощью методик, представленных подробно в [14]. При этом во внимание принимались лишь те результаты, относительная погрешность которых не превышала 2 %.

Учтем, что в идеальном случае «полного» теплового контакта зависимости температуры контактных тел описываются линейными зависимостями, рис. 3 (б). Охарактеризуем отклонения от величины нагрева параметром $\theta = T/T_c$ и перейдем к безразмерной координате:

$$\rho = \frac{2r}{L_c}, \tag{2}$$

где L_c – среднее расстояние между центрами микроконтактов.

На рис. 6 представлены характерные зависимости $\vartheta(\rho)$ для варьируемых значений относительного радиуса контактной площадки ρ_m .

Следует отметить, что установленные графики зависимостей $\vartheta(\rho)$ имеют форму, подобную гауссовой, амплитуда которой равна ϑ_m , а дисперсия ρ_m близка к радиусу микроконтакта. Ход кривой представляет интерес для последующих расчетов механических напряжений. Однако подробный анализ их характера и применимости гауссовой аппроксимации выходят за рамки настоящей работы.

Распределения температуры в направлении оси y , то есть «в глубину» контактного тела, оказались подобными рассмотренным выше «поверхностным». Анализировались также рассчитанные зависимости контактных сопротивлений от размера микроконтакта. Полученные результаты находятся в согласии с формулой Холла.

Рассмотрим ниже возможные следствия, возникающие при анализе полученных результатов.

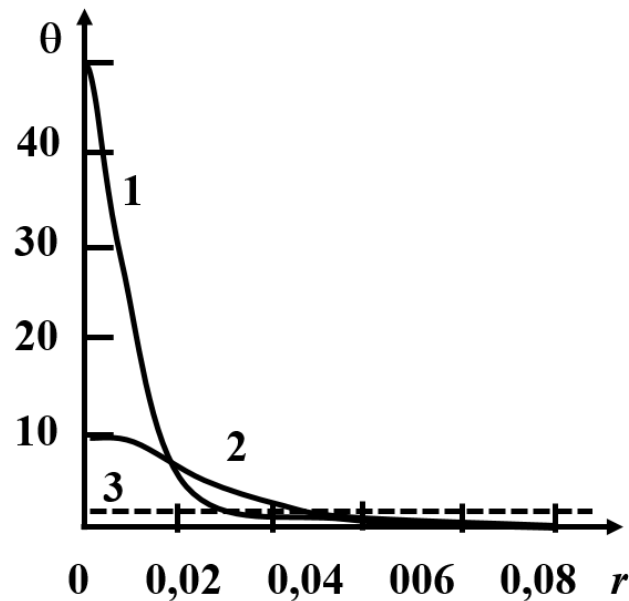


Рис. 6. Зависимости относительных перегревов от безразмерного расстояния до центра соседнего микроконтакта: 1, 2 – соответствуют относительным радиусам 0,05 и 0,1, соответственно; пунктир 3 – идеальный контакт

Rice. 6. Dependences of relative overheating on the dimensionless distance to the center of the adjacent microcontact: 1, 2 – correspond to relative radii of 0.05 and 0.1, respectively; dotted line 3 – perfect contact

В ряде предшествующих работ, представленных во введении настоящей работы, было показано, что одним из источников пожароопасности является высокое переходное сопротивление в области соединения двух проводников. В связи с тем что переходное сопротивление оказывается много больше, нежели сопротивление проводников, в области контакта формируется концентрация выделяющейся мощности Джоулева тепла. Было установлено, что перегрев контактной области приводит к окислению контактной поверхности [6]. В цитируемой работе было показано также, что процесс окисления может приводить к ухудшению электрического контакта и возникновению искрения.

Представленные выше компьютерные алгоритмы и программы, полученные нами, могут быть использованы для более корректного прогнозирования пожароопасных ситуаций, связанных с перегревами электрических контактов. В отличие от предшествующих работ, применение

компьютерного моделирования позволило обнаружить существование существенного, в десятки раз, перегрева микроконтактных точек.

Следует отметить необходимость дальнейшего развития компьютерных программ, описывающих процессы деградации электрических контактов. Применение представленных выше компьютерных технологий расширяет перспективы анализа процессов перегрева электрических контактов. В частности, возникают новые возможности прогнозирования сценариев отказов, связанных с окислением неравномерно нагретых поверхностей. Представленные в настоящей работе методы расчета температурных полей позволяют получать данные для описания процессов диффузии кислорода и формирования окислов в окрестностях микроконтактных точек. Появляется возможность корректно учитывать экспоненциальные зависимости скоростей окисления от температуры среды. По мнению авторов, представляет

значительный интерес исследование возможности существования синергетических механизмов, обуславливающих лавинообразное развитие процесса деградации электрических контактов [11]. Подобные процессы рассматривались в предшествующей работе [13], в которой методом компьютерного моделирования на основе МКЭ было обнаружено, что электрический пробой увлажненной поверхности может протекать, как синергетический процесс с обострением.

Следует также отметить, что в предложенной нами статье рассматривались регулярные структуры микроконтактов, имеющих одинаковые радиусы (рис. 4). Между тем реальные системы характеризуются хаотичным распределением расположения и размеров контактов. Проведенные в настоящей работе исследования поз-

воляют сделать предположения о некоторых закономерностях процессов окисления более реальных систем. Рис. 7 иллюстрирует одну из особенностей динамики окисления пятна касания, состоящего из набора микроконтактов различного размера. Черным цветом на рис. 7 обозначена металлическая фаза, серым – окисленная. Стрелки показывают возможные этапы эволюции системы по мере времени эксплуатации. Можно предположить, что существуют такие режимы эксплуатации, при которых окисление начинается с наименьших по размеру площадок и осуществляется в виде роста кольцеобразных структур.

Таким образом, предполагается дальнейшее развитие представленных выше компьютерных алгоритмов и программ.

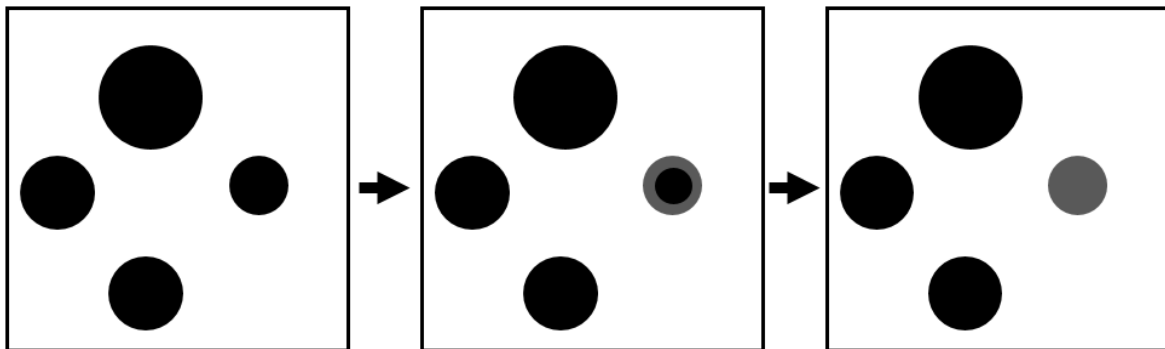


Рис. 7. Схема расположения контактных областей и их окисления: черный цвет – проводящая фаза; серый – окисная пленка, белый фон – не вступившая в контакт поверхность

Rice. 7. Scheme of the location of contact areas and their oxidation: black color – conducting phase, gray – oxide film; white background – surface that has not come into contact

Выводы

Предлагаются для дальнейшего использования специализированные компьютерные программы на основе МКЭ, предназначенные для прогнозирования локальных перегревов электрических контактов.

Методом компьютерного эксперимента показано, что одним из существен-

ных механизмов деградации электрических контактов является окисление микроконтактов, вызываемое их существенным, в десятки раз, перегревом.

Возможно дальнейшее развитие разработанных в настоящей работе компьютерных методик для оценок вероятного времени возникновения отказов.

Предлагается использовать разработанные компьютерные программы при

построении дерева событий возгорания, связанного с перегревом контактов.

При анализе процессов деградации электрических контактов необходимо учи-

тывать возможность реализации синергетического процесса, протекающего лавинообразно, в режиме с обострением, подобном рассмотренному в работе [13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А. С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30 (6). С. 108–113.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник. М., 2021. 112 с.
3. Веревкин В. Н., Смелков Г. И. Пожарная опасность электрических контактов и контактных соединений. М., 2009. 140 с.
4. Боков Г. В., Клепикова Т. Н. Снижение пожарной опасности электрических сетей многоэтажных жилых и общественных зданий // Пожарная безопасность. 2006. № 1. С. 60–64.
5. Моторыгин Ю. Д. Моделирование пожароопасных режимов в электросети автомобилей для принятия решения при проведении пожарно-технической экспертизы // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25 (9). С. 45–51.
6. Мельников В. С. Пожарная безопасность электроустановок, алгоритм зажигания // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). С. 1–11.
7. Безопасность жизнедеятельности / С. В. Белов и др. М., 2001. 487 с.
8. Хольм Р. Электрические контакты. М., 1961. 425 с.
9. Крагельский И. В. Трение и износ. М., 1968. 480 с.
10. Демкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М., 1970. 334 с.
11. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. М., 1972. 216 с.
12. Харламенков А. С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31 (1). С. 99–104.
13. Влияние синергетического механизма поверхностного межкапельного пробоя на риск электротравматизма / И. Н. Сачков и др. // Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23). С. 33–41.
14. Сачков И. Н. Влияние формы включений на проводимость двумерных регулярных матричных систем // Журнал технической физики. 1996. Т. 66 (12). С. 48–58.

REFERENCES

1. Kharlamenkov A.S. Fire hazard of high transient resistances. From theory to practice. Part 1. Fire and explosion safety. 2021; 30(6):108–113. (rus).
2. Fires and fire safety in 2020. Statistical collection. Moscow, 2021; 112 p. (rus).
3. Verevkin V.N., Smelkov G.I. Fire danger of electrical contacts and contact connections. Moscow, 2009; 140. (rus).
4. Bokov G.V., Klepikova T.N. Reducing the fire hazard of electrical networks of multi-storey residential and public buildings. Fire safety. 2006; 1: 60–64. (rus).
5. Motorygin Yu. D. Modeling of fire hazardous conditions in the electrical network of cars for decision-making during fire-technical examination. Fire and explosion safety. 2016; 25 (9): 45–51. (rus).
6. Melnikov V.S. Fire safety of electrical installations, ignition algorithm. International scientific research journal. 2023; 1(127):1–11. (rus).
7. Belov S.V., Ilnitskaya A.V., Kozyakov A.F. and others. Life safety. Moscow, 2001; 487. (rus).
8. Holm R. Electrical contacts. Moscow, 1961; 425. (rus).
9. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow, 1968. 480. (rus).
10. Demkin N.B. Contacting rough surfaces. Moscow, 1970; 334. (rus).
11. Levin A.P. Contacts of electrical connectors of radio-electronic equipment. Moscow, 1972; 216. (rus).
12. Kharlamenkov A.S. Fire hazard of high transient resistances. From theory to practice. Part 2. Fire and explosion safety. 2022; 31 (1):99–104. (rus).
13. Sachkov I.N., Kuanyshv V.T., Schneider A.V. Influence of the synergistic mechanism of surface interdroplet breakdown on the risk of electrical injuries. Technosphere safety. 2019; 2(23):33–41. (rus).
14. Sachkov I.N. Influence of the shape of inclusions on the conductivity of two-dimensional regular matrix systems. Journal. technical physics. 1996; 66 (12):48–58. (rus).

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-29-00411.

Информация об авторах

Сачков Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры анализа систем и принятия решений, Уральский федеральный университет, Россия, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; РИНЦ ID: 20328; Scopus Author ID: 6602115669; ResearcherID: -; ORCID: 0000-0003-2265-5860; e-mail: i.n.sachkov@urfu.ru

Куанышев Валерий Таукенович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики, Россия, 620109, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15; РИНЦ ID: 118889; Scopus Author ID: 6506316875; ResearcherID: -; ORCID: -; e-mail: kvt@urtisi.ru

Кобелев Антон Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем противопожарной защиты, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

Information about the authors

Igor N. Sachkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Systems Analysis and Decision Making, Ural Federal University, st. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; RSCI ID: 20328; Scopus Author ID: 6602115669; ResearcherID: -; ORCID: 0000-0003-2265-5860; e-mail: i.n.sachkov@urfu.ru

Valery T. Kuanyshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics, st. Repina, 15, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; RSCI ID: 118889; Scopus Author ID: 6506316875; ResearcherID: -; ORCID: -; e-mail: kvt@urtisi.ru

Anton M. Kobelev, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Fire Protection Systems, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

УДК 614.84

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ОБСТАНОВКИ С ПОЖАРАМИ

Штерензон Вера Анатольевна^{1,2}, Худякова Светлана Александровна²,
Шпаньков Андрей Владимирович²

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

²Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Современный этап цивилизационного развития характеризуется трендом постепенного перехода развитых экономических систем к шестому технологическому укладу, основой которого являются высокотехнологичные автоматизированные системы и процессы. В производственную и бытовую жизнь современного человека всё больше входят дорогостоящие социотехнические системы, совокупное действие и отказы которых могут приводить к уменьшению безопасной среды, повышению рисков для человека и финансовым потерям. Параллельно наблюдается и (судя по всему) развивается тренд на увеличение количества чрезвычайных ситуаций (ЧС): стихийных природных бедствий и техногенных катастроф. Сознательное и бессознательное негативное влияние человека на окружающий его мир и ответная реакция био- и техносферы сегодня отражаются в статистике пожаров, землетрясений, наводнений, взрывов промышленных и бытовых систем и т. д., в повышении материального ущерба и количества пострадавших, повышении затрат на восстановление человека и человекоориентированной среды обитания.

Так как сегодня обеспечение пожарной и техносферной безопасности является приоритетной задачей любого государства как с социально-экономической, так и с политической точки зрения, для превентивного упреждения негативных последствий ЧС необходимо выявление закономерностей, связывающих показатели человеческого противодействия ЧС и показатели последствий ЧС.

В статье исследуется влияние показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на показатели обстановки с пожарами в субъектах и федеральных округах Российской Федерации в период 2017–2021 гг. Установлено, что в абсолютном большинстве регионов статистически значимого влияния показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на показатели обстановки с пожарами нет, общих закономерностей их взаимовлияния нет, выявлены только единичные частные зависимости.

Ключевые слова: количество пожаров, количество погибших, материальный ущерб, оперативное реагирование и тушение пожаров, время сообщения о пожаре, время прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара, время подачи первого ствола, время локализации пожара, время ликвидации открытого горения, время ликвидации последствий пожара

THE INFLUENCE OF RAPID RESPONSE AND FIRE EXTINGUISHING INDICATORS ON FIRE SITUATION INDICATORS

Shterenzon Vera A.¹, Khudyakova Svetlana A.², Shpankov Andrey V.²,

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russian Federation

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

ABSTRACT

The current stage of civilizational development is characterized by a gradual transition trend for developed economic systems to the sixth technological mode, which is based on high-tech automated systems and processes. The production and everyday life of a modern person increasingly includes expensive socio-technical systems, which cumulative action and failures can lead to safe environment decrease, increased person risks and financial losses. In parallel, we can observe a developing emergencies (ES) upward trend: natural disasters and man-made disasters. The conscious and unconscious negative people impact to the world around him and today's bio and technosphere response are reflected in the statistics of fires, earthquakes, floods, explosions of industrial and domestic systems, etc., in material damage increase and in victims number increase, in increase of the cost of human restoration and human-centered environment restoration.

Since today the fire and technosphere safety provision is an any state priority task, both from a socio-economic and political point of view, in order to prevent the negative consequences of emergency situations, it is necessary to identify patterns linking indicators of human response to emergencies and indicators of the emergencies consequences.

The article examines the impact of rapid response and fire extinguishing indicators on fires situation indicators in regions and federal districts of the Russian Federation during 2017-2021. It has been established that in the absolute majority of regions there is no statistically significant influence of the prompt response and fire extinguishing indicators on the fires situation indicators, there are no general patterns of their mutual influence, only single partial dependencies have been identified.

Keywords: number of fires, death toll, material damage, operational response and extinguishing fires, fire notification time, time of the first fire department arrival to the fire place, time of the first fire barrel delivery, time of the fire localization, fire extinguishing time, time for a fire consequences eliminating

Введение

Оперативное реагирование на ЧС – осуществление взаимосвязанных действий органов управления РСЧС по незамедлительному получению информации о факте возникновения ЧС, своевременному оповещению о них населения и заинтересованных организаций, а также уточнению и анализу обстановки, принятию решений и организации ликвидации ЧС соответствующими силами и средствами [1].

Несмотря на то что деятельность пожарно-спасательных подразделений МЧС Российской Федерации регламентируется едиными для всех нормативными документами, статистические данные по количеству пожаров, материальному ущербу и количеству погибших в федеральных округах, публикуемые каждый год в статистических сборниках ФГБУ ВНИИПО МЧС России, отражают сложившиеся традиции и модели организации пожарно-

спасательной деятельности, качество профессиональной подготовки и уровень профессиональной компетентности сотрудников подразделений ГПС МЧС, значительные географические и социально-экономические отличия субъектов Российской Федерации.

Для анализа региональных систем организации и управления оперативной деятельностью пожарно-спасательных подразделений целесообразно использовать показатели оперативного реагирования и тушения пожаров, к которым относятся:

- время сообщения о пожаре – $T_{\text{сообщ}}$;
- время прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара – $T_{\text{приб}}$;
- время подачи первого ствола – $T_{\text{1ств}}$;
- время локализации – пожара $T_{\text{лок}}$;
- время ликвидации открытого горения – $T_{\text{лик_откр}}$;
- время ликвидации последствий пожара – $T_{\text{лик_посл}}$.

Данные показатели можно считать базовыми. Также показателями оперативного реагирования и тушения пожаров являются время свободного горения, время тушения, время занятости на пожаре, время обслуживания вызова. Эти показатели являются производными от базовых, перечисленных выше. Все перечисленные показатели зависят от большого количества случайных и систематических факторов, носят случайный характер, являются случайными величинами, и поэтому в ежегодных сборниках ФГБУ ВНИИПО «Статистика пожаров и их последствий» указаны усредненные (средние) значения перечисленных показателей оперативного реагирования и тушения пожаров по годам и субъектам Российской Федерации.

Логично предположить, что увеличение значений показателей, которые

выше были определены как базовые, должно приводить к увеличению материального ущерба и количеству погибших/пострадавших от пожара. Чем дольше добираться к месту пожара первое пожарное подразделение, чем больше времени уходит на локализацию пожара, на ликвидацию открытого горения и последствий пожара, тем больше бед может принести пожар: не смогут выбраться из зоны пожара люди, увеличится площадь охваченных огнем сооружений и имущества. В каждом федеральном округе и субъекте Российской Федерации это, скорее всего, имеет свои особенности, но исследования этого вопроса немногочисленны [2–4]. Авторам статьи не удалось найти результаты исследований и сводный анализ влияния указанных показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб и количество погибших по федеральным округам и субъектам Российской Федерации за последние 5–6 лет. Этот факт делает данное исследование актуальным.

Объект исследования – показатели оперативного реагирования и тушения пожаров по федеральным округам и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг.

Предмет исследования – влияние показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб и количество погибших по федеральным округам и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг.

Гипотеза исследования – с увеличением значений показателей оперативного реагирования и тушения пожаров материальный ущерб и количество погибших всегда увеличивается.

Методы исследования – методы системного анализа, математической статистики, статистического (корреляционного, регрессионного) и кластерного анализа, математического анализа и моделирования.

Программное обеспечение – статистическая графическая система Statgraphics for Windows.

Статистические данные для данного исследования взяты из сборников ФГБУ ВНИИПО МЧС России за 2017-2021 гг [5–7].

Статистический анализ показателей обстановки с пожарами

Согласно статистическим данным ФГБУ ВНИИПО показатели обстановки с пожарами (количество пожаров, материальный ущерб, количество погибших) существенно отличаются по федеральным округам и субъектам Российской Федерации, зависят от большого числа факторов и носят случайный характер. Статистический анализ выборок (средних значений – по t-критерию, дисперсий – по F-критерию) количества пожаров по исследуемым годам не выявил между выборками статистически значимой разницы, что позволило объединить выборки по годам в общую (генеральную) выборку по Российской Федерации для дальнейших исследований. Аналогичные результаты были получены по выборкам значений количества погибших и выборкам значений материального ущерба. Объем выборок по годам – более 85 значений, объем общих выборок – более 400 значений.

Проверка гипотезы о распределении (по критериям Пирсона и Колмогорова-Смирнова) выборки значений количества пожаров за исследуемый период не выявила закона распределения этой случайной величины, который можно было бы использовать для модельного прогнозного описания. Аналогичная ситуация с количеством погибших и материальным ущербом.

Корреляционный анализ тесноты связи количества пожаров и материального ущерба за указанный период выявил среднюю корреляционную связь (коэффициент парной корреляции $r \sim 0,45$ для городов РФ и $r \sim 0,35$ для сельской местности)

между указанными случайными величинами. Между количеством пожаров и количеством погибших выявлена достаточно сильная корреляционная связь (коэффициент парной корреляции $r \sim 0,86$ для городов РФ и $r \sim 0,81$ для сельской местности).

Аналогичный анализ был выполнен и для федеральных округов РФ, результаты представлены в таблице 1.

Представленные результаты показывают очень разнородную картину по федеральным округам, что, безусловно, определяется различиями в социально-экономическом и промышленном развитии, качестве жизни, климате, населении и т.д. в федеральных округах. Исследования по указанным факторам были опубликованы авторами ранее в работах [8 – 10]. Вместе с тем, во всех федеральных округах влияние количества пожаров на количество погибших очень велико, налицо сильная корреляционная связь, и полученные результаты можно использовать для прогнозирования ситуации на последующие периоды времени. Что касается материального ущерба, то здесь картина несколько иная, но общим является отсутствие сильной корреляционной связи между количеством пожаров и материальным ущербом, налицо средняя и слабая корреляционная связь, и полученные результаты можно использовать только для понимания направленности связи между количеством пожаров и материальным ущербом.

Статистический анализ показателей оперативного реагирования

Статистический анализ выборок проводился с учетом (средних – по t-критерию, дисперсий – по F-критерию) указанных показателей:

- время сообщения о пожаре – $T_{\text{сообщ}}$;

Табл. 1.

Результаты корреляционного анализа показателей ситуации с пожарами в федеральных округах РФ

Table 1.

Correlation analysis results for indicators of the situation with fires in the federal districts of the Russian Federation

Федеральный округ Federal district	Коэффициент тесноты связи Correlation coefficient MatU = f(Npoj)		Коэффициент тесноты связи Correlation coefficient Nrog = f(Npoj)	
	Город	Село	Город	Село
	Центральный ФО Central FD	0,55	0,95	0,52
Северо-Западный ФО Northwestern FD	0,13	0,36	0,15	0,77
Южный ФО Southern FD	0,59	0,91	0,66	0,93
Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	0,67	0,86	0,75	0,97
Приволжский ФО Privolzhsky FD	0,18	0,70	0,10	0,53
Уральский ФО Ural FD	0,34	0,91	-0,41	0,77
Сибирский ФО Siberian FD	0,39	0,91	0,38	0,87
Дальневосточный ФО Far Eastern FD	0,56	0,90	0,27	0,80

Здесь и далее:

- MatU – материальный ущерб,
- Npoj – количество пожаров,
- Nrog – количество погибших.

- время прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара – $T_{\text{приб}}$;
- время подачи первого ствола – $T_{\text{1ств}}$;
- время локализации пожара – $T_{\text{лок}}$;
- – время ликвидации открытого горения – $T_{\text{лик_откр}}$;
- время ликвидации последствий пожара – $T_{\text{лик_посл}}$.

Анализ не выявил внутри каждого показателя между выборками статистиче-

ски значимой разницы по исследуемым годам, что позволило объединить выборки по годам в общую для каждого показателя (генеральную) выборку по федеральному округу. Объем выборок по годам – более 85 значений, объем общих выборок – более 400 значений.

Проверка гипотезы о распределении (по критериям Пирсона и Колмогорова-Смирнова) выборки значений указанных факторов за исследуемый период не выявила какого-то единого для них закона распределения этих случайных непрерывных величин, который можно

было бы использовать для общего модельного прогнозного описания. При всей схожести пожаров, тем не менее, каждый из них является уникальным по причинам, протеканию и последствиям. Один пожар в столичном торговом центре может по последствиям перекрыть несколько пожаров в далеких малонаселенных пунктах. По отдельным показателям и по отдельным округам были обнаружены совершенно разные законы распределения, что не позволяет сформировать единый подход для модельного описания конкретного показателя. Например, в Дальневосточном ФО для времени ликвидации открытого горения (в городах) был выявлен нормальный закон распределения, но это скорее исключение, чем общая особенность (закономерность) для этого показателя. Тем более не было выявлено единого закона распределения для описания всех показателей оперативного реагирования.

Время сообщения о пожаре

Время сообщения о пожаре ($T_{\text{сообщ}}$) – это один из показателей оперативного реагирования населения и подразделений пожарной охраны на пожар. Вычисляется как разность между астрономическими временами сообщения и обнаружения пожара [11].

Средние значения времени сообщения о пожаре $T_{\text{сообщ}}$ по федеральным округам (ФО) и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг. даны в таблице 2, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{\text{сообщ}}$ (город) ≈ 0 –7,46 мин; $T_{\text{сообщ}}$ (село) ≈ 0 –7,38 мин. Таблица 2 показывает, что в различных федеральных округах разница средних значений времени сообщения о пожаре может достигать 100 %.

Табл. 2.

Среднее время сообщения $T_{\text{сообщ}}$ о пожаре в федеральных округах РФ

Table 2.

Average fire report time in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{\text{сообщ}}$, МИН T_{report} , min (города) (cities)	1,66	1,02	0,78	0,9	1,17	1,07	1,9	0,92
$T_{\text{сообщ}}$, МИН T_{report} , min (сельская местность) (countryside)	2,14	1,35	0,95	1,24	1,31	1,23	2,3	1,16

Время прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара

Время прибытия $T_{\text{приб}}$ первого подразделения пожарных к месту вызова – один из показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны на пожар [11]. Время прибытия $T_{\text{приб}}$ первого подразделения к месту вызова в городских поселениях и городских округах не должно превышать 10 мин, а в сельских поселениях – 20 мин [12].

Средние значения времени прибытия первого подразделения к месту вызова по федеральным округам (ФО)

и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг. даны в таблице 3, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{\text{приб}}$ (город) \approx 3–10 мин; $T_{\text{приб}}$ (село) \approx 0–20,2 мин. Таблица 3 показывает, что время прибытия первого подразделения к месту пожара является более однородной характеристикой как в городах, так и в сельской местности различных федеральных округов, разница средних значений времени прибытия первого подразделения к месту вызова составляет \approx 30–40 %.

Табл. 3

Среднее время прибытия $T_{\text{приб}}$ первого подразделения к месту вызова в федеральных округах РФ

Table 3

Average arrival time of the first unit arrival to the fire place in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{\text{приб}}$, мин (города) Tarrival, min (cities)	6,2	5,9	6,7	6,3	6,3	6,2	6,6	6,1
$T_{\text{приб}}$, мин (сельская местность) Tarrival, min (countryside)	13,3	13,0	10,9	12,0	11,3	9,2	13,0	9,6

Время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$

Время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$ – это один из показателей оперативного реагирования населения и подразделений

пожарной охраны на пожар. Вычисляется как разность между астрономическими временами подачи первого ствола и прибытия первого подразделения пожарной

охраны к месту пожара [11]. Время оперативной подачи первого ствола – до 90 сек (1,5 мин).

Средние значения времени подачи первого ствола по федеральным округам (ФО) и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг. даны в таблице 4, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{1\text{ств}}(\text{город}) \approx 0,1\text{--}1,8$ мин;

$T_{1\text{ств}}(\text{село}) \approx 0,1\text{--}2,1$ мин. Таблица 4 показывает, что время подачи первого ствола также является достаточно однородной характеристикой как в городах, так и в сельской местности различных федеральных округов, максимальная разница средних значений времени подачи первого ствола составляет $\approx 40\text{--}50\%$. Во всех округах среднее время подачи 1-го ствола укладывается в требуемые 90 сек (1,5 мин).

Табл. 4.

Среднее время подачи 1-го ствола $T_{1\text{ств}}$ в федеральных округах РФ

Table 4.

Average 1st trunk delivery time in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{1\text{ств}}$, мин (города) $T_{1\text{trunk}}$, min (cities)	1,1	1,05	0,74	0,95	1,12	1,0	1,1	1,01
$T_{1\text{ств}}$, мин (сельская местность) $T_{1\text{trunk}}$, min (country- side)	1,0	1,07	0,74	1,0	1,06	0,97	1,0	0,99

Время локализации пожара

Время локализации пожара $T_{\text{лок}}$ – это один из показателей оперативного реагирования населения и подразделений пожарной охраны на пожар. Вычисляется как разность между астрономическими временами локализации пожара и подачи первого ствола [11].

Средние значения времени локализации пожара по федеральным округам (ФО) и субъектам Российской Федерации

в период 2017–2021 гг. даны в таблице 5, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{\text{лок}}(\text{город}) \approx 1\text{--}15,3$ мин; $T_{\text{лок}}(\text{село}) \approx 0\text{--}27,6$ мин. Время локализации пожара сильно зависит от обстоятельств конкретной ситуации и имеет большее рассеяние. Таблица 5 показывает, что максимальная разница средних значений времени локализации в городах различных федеральных округов составляет $\approx 40\%$, а сельской местности $\approx 75\%$.

Табл. 5.

Среднее время $T_{лок}$ локализации пожара в федеральных округах РФ

Table 5.

Average fire localization time in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{лок}$, МИН (города) $T_{лок}$, min (cities)	5,3	6,4	4,1	4,7	5,0	4,6	5,3	6,1
$T_{лок}$, МИН (сельская местность) $T_{лок}$, min (countryside)	8,1	10,1	5,8	5,6	8,6	7,0	8,4	8,5

Время ликвидации открытого горения

Время ликвидации открытого горения ($T_{лик.откр.}$) – это один из показателей оперативного реагирования населения и подразделений пожарной охраны на пожар. Вычисляется как разность между астрономическими временами ликвидации открытого горения и локализации пожара [11].

Средние значения времени ликвидации открытого горения $T_{лик.откр.}$ по федеральным округам (ФО) и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг.

даны в таблице 6, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{лик.откр.}$ (город) $\approx 1,3$ – $15,3$ мин; $T_{лик.откр.}$ (село) ≈ 0 – $31,9$ мин. Время ликвидации открытого горения зависит от еще большего количества факторов в конкретной ситуации, и тем не менее средние значения времени ликвидации открытого горения довольно однородны. Таблица 6 показывает, что максимальная разница средних значений времени ликвидации открытого горения в городах различных федеральных округов составляет $\approx 30\%$, а сельской местности $\approx 35\%$.

Табл. 6.

Среднее время ликвидации $T_{лик_откр}$ открытого горения в федеральных округах РФ

Table. 6.

Average open fire liquidation time in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{лик_отк}$, МИН (города) T_{fire_liq} , min (cities)	6,8	7,2	5,8	6,2	5,8	5,6	5,7	6,3
$T_{лик_отк}$, МИН (сельская местность) T_{fire_liq} , min (countryside)	11,0	13,0	8,8	9,6	10,4	9,0	10,8	12,0

Время ликвидации последствий пожара

Среднее время ликвидации последствий пожара (мин) – один из показателей оперативного реагирования населения и подразделений пожарной охраны на пожар. Вычисляется как разность между астрономическими временами ликвидации последствий пожара и ликвидации открытого горения [11].

Ликвидация последствий пожара – это совокупные действия участников тушения пожара, направленные на окончательное прекращение горения, а также на исключение возможности его повторного возникновения [13].

Пожар считается ликвидированным, если одновременно выполнены следующие условия: прекращено горение, исключены условия для самопроизвольного возникновения горения [Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444 (ред. от 28.02.2020) «Об утверждении Боевого

устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» (Зарегистрировано в Минюсте России 20.02.2018 № 50100).

Средние значения времени ликвидации последствий пожара $T_{лик_посл}$ по федеральным округам (ФО) и субъектам Российской Федерации в период 2017–2021 гг. даны в таблице 7, общие пределы изменения по всем субъектам РФ: $T_{лик_посл}$ (город) \approx 2–54 мин; $T_{лик_посл}$ (село) \approx 0–78 мин. Время ликвидации последствий пожара зависит от еще большего количества факторов в конкретной ситуации и тем не менее средние значения времени ликвидации открытого горения довольно однородны. Таблица 7 показывает, что максимальная разница средних значений времени ликвидации открытого горения в городах различных федеральных округов составляет \approx 30 %, а сельской местности \approx 35 %.

Табл. 7.

Среднее время ликвидации последствий пожара $T_{лик_посл}$ в федеральных округах РФ

Table 7.

Average time of a fire consequences liquidation in the federal districts of the Russian Federation

	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
$T_{лик_пос, мин}$ (город) $T_{cons_liq, min}$ (cities)	24,4	17,6	11,6	14,7	21,4	19,3	22,8	17,0
$T_{лик_пос, мин}$ (село) $T_{cons_liq, min}$ (countryside)	41,4	29,9	17,6	22,1	35,3	28,2	37,9	26,8

Результаты исследования и моделирования

Для оценки влияния показателей реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб и количество погибших в городах и сельской местности федеральных округов Российской Федерации был проведен корреляционный, регрессионный и кластерный анализ. Исследовалась корреляционная связь между показателями реагирования и тушения пожаров, с одной стороны и материальным ущербом/количеством погибших в городах и сельской местности с другой стороны. Результаты даны в таблицах 8–11. Для оценки корреляционной связи был использован коэффициент парной корреляции r с градацией по шкале Чеддока:

- $0,0 < r \leq 0,3$ – очень слабая корреляционная связь;

- $0,31 < r \leq 0,5$ – слабая корреляционная связь;
- $0,51 < r \leq 0,7$ – средняя корреляционная связь;
- $0,71 < r \leq 0,9$ – высокая корреляционная связь;
- $0,91 < r \leq 1,0$ – очень высокая корреляционная связь.

Обозначения, используемые далее в таблицах:

- \uparrow – положительная (средняя и выше) корреляционная связь (коэффициент парной корреляции $\geq 0,5$);
- \downarrow – отрицательная (средняя и выше) корреляционная связь (коэффициент парной корреляции $\leq -0,5$);
- \square – слабая и очень слабая корреляционная связь.

Табл. 8.

Сводные результаты влияния показателей реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб в городах федеральных округов РФ

Table 8.

Summary results of fire response and extinguishing indicators influence on material damage in cities of the Russian Federation federal districts

Показатель реагирования и тушения пожаров Fire response and extinguishing indicator	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
Время сообщения о пожаре $T_{\text{сообщ}}$ Fire report time, T_{report}								
Время прибытия первого подразделения $T_{\text{приб}}$ Arrival time. T_{arrival}		↑ $r=0,52$						
Время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$ 1st trunk delivery time, $T_{1\text{trunk}}$								
Время локализации пожара $T_{\text{лок}}$ Fire localization time, $T_{\text{fire_loc}}$		↑ $r=0,51$						
Время ликвидации открытого горения $T_{\text{лик. откр.}}$ Fire liquidation time, $T_{\text{fire_liq}}$								
Среднее время ликвидации последствий пожара $T_{\text{лик. посл}}$ Fire consequences liquidation time $T_{\text{cons_liq}}$							↑ $r=0,52$	

Табл. 9.

Сводные результаты влияния показателей реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб в сельской местности федеральных округов РФ

Table 9.

Summary results of fire response and extinguishing indicators influence on material damage in countryside of the Russian Federation federal districts

Показатель реагирования и тушения пожаров Fire response and extinguishing indicator	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
Время сообщения о пожаре $T_{\text{сообщ}}$ Fire report time, T_{report}			↑ $r=0,5$					
Время прибытия первого подразделения $T_{\text{приб}}$ Arrival time. T_{arrival}								
Время подачи первого ствола $T_{\text{1ств}}$ 1st trunk delivery time, T_{1trunk}				↓ $r=-0,54$				
Время локализации пожара $T_{\text{лок}}$ Fire localization time, $T_{\text{fire_loc}}$								
Время ликвидации открытого горения $T_{\text{лик. откр.}}$ Fire liquidation time, $T_{\text{fire_liq}}$								
Среднее время ликвидации последствий пожара $T_{\text{лик. посл}}$ Fire consequences liquidation time $T_{\text{cons_liq}}$							↑ $r=0,56$	↓ $r=-0,5$

Табл. 10.

Сводные результаты влияния показателей реагирования и тушения пожаров на количество погибших в городах федеральных округов РФ

Table 10.

Summary results of fire response and extinguishing indicators influence on death toll in cities of the Russian Federation federal districts

Показатель реагирования и тушения пожаров Fire response and extinguishing indicator	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD

Время сообщения о пожаре $T_{\text{сообщ}}$ Fire report time, T_{report}				↓ $r = -0,51$				
Время прибытия первого подразделения $T_{\text{приб}}$ Arrival time. T_{arrival}	↑ $r = 0,54$	↑ $r = 0,61$					↑ $r = 0,5$	↑ $r = 0,6$
Время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$ 1st trunk delivery time, $T_{1\text{trunk}}$								
Время локализации пожара $T_{\text{лок}}$ Fire localization time, $T_{\text{fire_loc}}$								
Время ликвидации открытого горения $T_{\text{лик. откр.}}$ Fire liquidation time, $T_{\text{fire_liq}}$								
Среднее время ликвидации последствий пожара $T_{\text{лик. посл}}$ Fire consequences liquidation time $T_{\text{cons_liq}}$		↑ $r = 0,6$		↑ $r = 0,52$				

Табл. 11.

Сводные результаты влияния показателей реагирования и тушения пожаров на количество погибших в сельской местности федеральных округов РФ

Table 11.

Summary results of fire response and extinguishing indicators influence on death toll in countryside of the Russian Federation federal districts

Показатель реагирования и тушения пожаров Fire response and extinguishing indicator	Центральный ФО Central FD	Северо-Западный ФО Northwestern FD	Южный ФО Southern FD	Северо-Кавказский ФО North Caucasian FD	Приволжский ФО Privolzhsky FD	Уральский ФО Ural FD	Сибирский ФО Siberian FD	Дальневосточный ФО Far Eastern FD
Время сообщения о пожаре $T_{\text{сообщ}}$ Fire report time, T_{report}				↓ $r = -0,6$				
Время прибытия первого подразделения $T_{\text{приб}}$ Arrival time. T_{arrival}		↑ $r = 0,52$						↑ $r = 0,66$
Время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$ 1st trunk delivery time, $T_{1\text{trunk}}$		↓ $r = -0,57$		↓ $r = -0,81$				
Время локализации пожара $T_{\text{лок}}$ Fire localization time, $T_{\text{fire_loc}}$								
Время ликвидации открытого горения $T_{\text{лик. откр.}}$ Fire liquidation time, $T_{\text{fire_liq}}$								

Среднее время ликвидации последствий пожара $T_{лик_посл}$ Fire consequences liquidation time T_{cons_liq}		↑ $r=0,5$					
---	--	--------------	--	--	--	--	--

Анализ результатов в таблицах 8–11 показал:

- исследованные показатели реагирования и тушения пожаров не оказывают существенного влияния на материальный ущерб от пожаров в городах и сельской местности федеральных округов РФ – из 96 сочетаний показатель/округ корреляционная связь выявлена только в 7 случаях, теснота корреляционной связи – средняя ($r \approx 0,5–0,56$);

- единой закономерности влияния показателей реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб не выявлено, присутствуют частные ситуации влияния (порой разнонаправленного) показателей на материальный ущерб в отдельных федеральных округах;

- влияние показателей реагирования и тушения пожаров на количество погибших от пожаров в городах и сельской местности федеральных округов РФ проявляется чаще – из 96 сочетаний показатель/округ корреляционная связь выявлена уже в 13 случаях, теснота корреляционной связи, в целом, выше – средняя и сильная ($r \approx 0,5–0,81$), но в большинстве случаев показатели реагирования и тушения пожаров существенного влияния на количество погибших в городах и сельской местности федеральных округов РФ не оказывают;

- единой закономерности влияния показателей реагирования и тушения пожаров на количество погибших также не выявлено, присутствуют только частные

ситуации в отдельных федеральных округах;

- независимо от отличительных особенностей федеральных округов (площадь, уровень промышленного развития и инфраструктур, климат, плотность населения, материально-техническое оснащение и реальный уровень профессиональной компетентности сотрудников ГПС, соотношение городского и сельского населения, стоимость основных фондов и жилого фонда и т. д.) и системы организации реагирования и тушения пожаров, во всех федеральных округах рассмотренные показатели реагирования и тушения пожаров в тех пределах, которые были выявлены и отражены в табл.2–7, одинаково не оказывают серьезного влияния на материальный ущерб и количество погибших как в городах, так и в сельской местности.

Кластерный анализ (использован Метод k-Means, мера расстояния Euclidean distances) общих выборок исследованных показателей по Российской Федерации выявил, что для всех федеральных округов (как для городской, так и для сельской местности) общие выборки значений материального ущерба $MatU$ и количества погибших $N_{пог}$ распадаются на три разнородные группы по характеру влияния конкретного показателя реагирования и тушения пожаров как на материальный ущерб $MatU$, так и на количество погибших $N_{пог}$. Например, рис. 1–2 показывают рассеяние и группирование пар $T_{приб} - MatU$ и $T_{приб} - N_{пог}$.

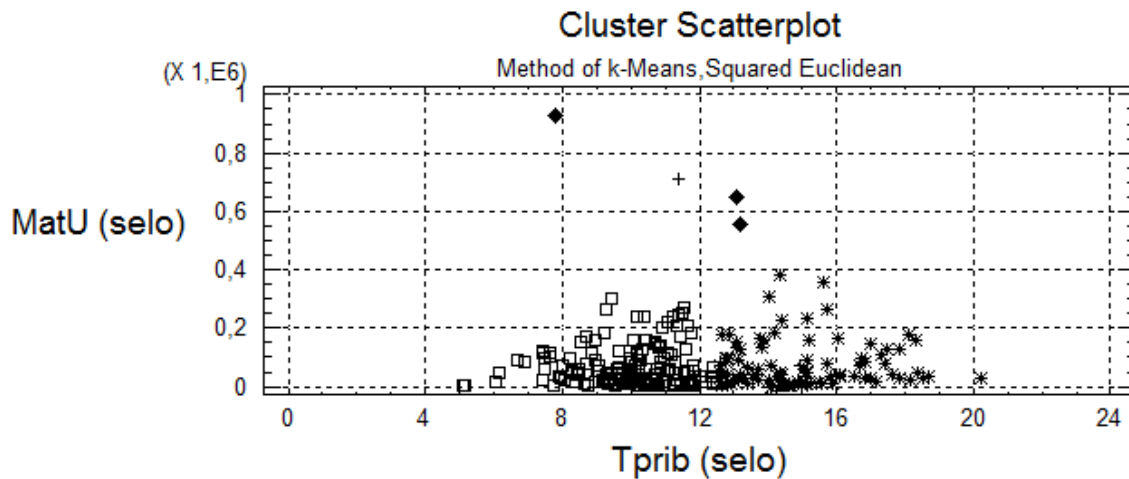


Рис. 1. Рассеяние значений $T_{\text{приб}}$ – MatU в сельской местности федеральных округов РФ
Fig. 1. Scattering $T_{\text{приб}}$ - MatU values in the federal districts countryside of the Russian Federation

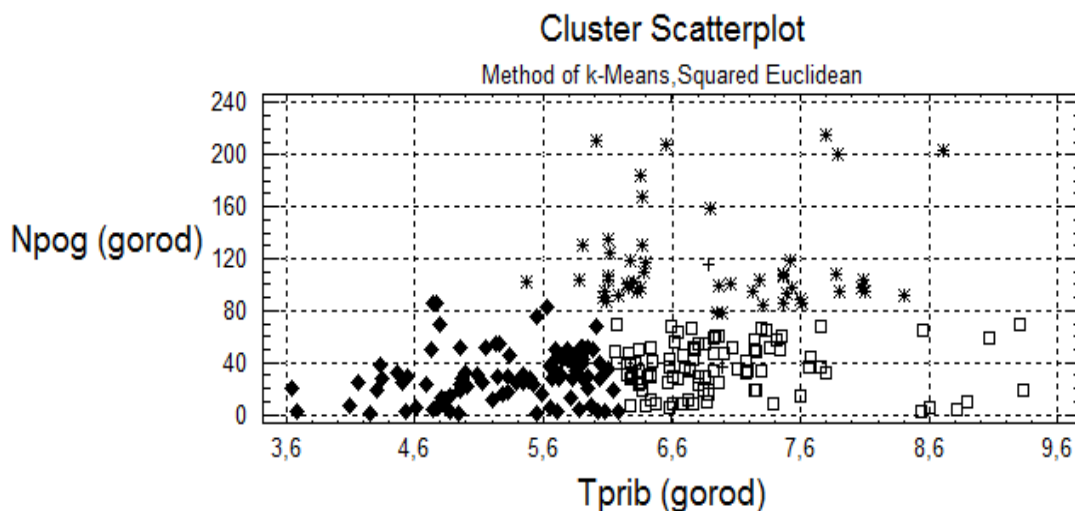


Рис. 2. Рассеяние значений $T_{\text{приб}}$ – N_{rog} в городах федеральных округов РФ
Fig. 2. Scattering $T_{\text{приб}}$ – N_{rog} values in the federal districts cities of the Russian Federation

Из рис. 1-2 очевидно, что для группы I характерны малые значения показателя (времени) реагирования и тушения пожаров и большие (на фоне других групп) значения материального ущерба и количества погибших. Для группы II характерны такие же малые значения показателя (времени) и меньшие по сравнению с группой I значения материального ущерба и количества погибших. Для группы III характерны большие значения времени и такие же, как в группе II, значения материального ущерба и количества погибших. Также

из рисунков очевидно наличие разных для этих групп регрессионных трендов.

Аналогичные исследования влияния на материальный ущерб и количество погибших были выполнены для всех показателей реагирования и тушения пожаров (время прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара $T_{\text{приб}}$, время подачи первого ствола $T_{1\text{ств}}$, время локализации пожара $T_{\text{лок}}$, время ликвидации открытого горения $T_{\text{лик_откр}}$, время ликвидации последствий пожара $T_{\text{лик_посл}}$) для городов и сельской местности всех федеральных

округов РФ. Полученные результаты аналогичны рис. 1–2, и это объясняет невысокие значения коэффициентов парной корреляции (указанные выше в таблицах 8–11) и отсутствие сильной корреляционной связи между показателями реагирования и тушения пожаров и показателями обстановки с пожарами. Исследование показало, что в группе I по всем показателям реагирования и тушения пожаров чаще присутствуют субъекты РФ с высокой плотностью промышленно-экономического присутствия и высокой плотностью населения (например, в этой группе всегда присутствуют Московская область, Свердловская область и др.). В группе II чаще присутствуют субъекты РФ с достаточно небольшой площадью территории, средней плотностью населения и меньшей, чем в группе I, стоимостью различных сооружений (например, в этой группе часто присутствует Калужская область, Владимирская область, Мари Эл и др.). В группе III чаще присутствуют разнородные по своим особенностям субъекты РФ.

Заключение

Проверка гипотезы о распределении показателей реагирования и тушения пожаров, а также показателей обстановки с пожарами за исследуемый период 2017–2021 гг. не выявила законов распределения (тем более – общего закона распределения), которые можно было бы использовать для модельного прогнозного описания этих случайных величин и характеризующих ими событий. При исследовании влияния количества пожаров на материальный ущерб в городской местности по всем федеральным округам РФ в период 2017–2021 гг. установлено наличие слабой и средней корреляционной связи, а вот для сельской местности, кроме Северо-Западного ФО, выявлено наличие сильной корреляционной связи. При исследовании

влияния количества пожаров на количество погибших в городской местности по всем федеральным округам РФ в период 2017–2021 гг. также установлена слабая и средняя корреляционная связь (исключение – Северо-Кавказский ФО, высокая плотность населения), а в сельской местности также выявлено наличие сильной и очень сильной корреляционной связи. В Северо-Кавказском ФО и материальный ущерб, и количество погибших очень сильно зависят от количества пожаров. В то же время в Северо-Западном ФО выявлена практически противоположная ситуация.

Проведенные исследования опровергли сформулированную во введении гипотезу исследования: с увеличением значений показателей оперативного реагирования и тушения пожаров материальный ущерб и количество погибших всегда увеличиваются. Оказалось, что это не так. Таблицы 8–11 показывают, во-первых, отсутствие в абсолютном большинстве федеральных округов хоть какого-либо влияния показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб и количество погибших; во-вторых, совершенно разное векторное и слабое влияние показателей оперативного реагирования и тушения пожаров на материальный ущерб и количество погибших в тех федеральных округах, где это влияние установлено.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследованные показатели реагирования и тушения пожаров не могут рассматриваться как серьезно влияющие на материальный ущерб и количество погибших факторы в рамках федеральных округов. Что касается конкретных субъектов РФ и их конкретных особенностей и отличий, то здесь необходимо проводить дополнительные исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оперативное реагирование на чрезвычайную ситуацию. Термины МЧС России. [Электронный ресурс]. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/3106> (дата обращения 25.10.2023 г.).
2. Маштаков В.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Кондашов А.А. Сравнение показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны территорий, находящихся в различных климатических условиях // Актуальные вопросы пожарной безопасности, 2021 № 4 (10). С.6-10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50520000> DOI: [10.34987/2712-9233.2023.50.54.005](https://doi.org/10.34987/2712-9233.2023.50.54.005)
3. Романова О.Ю. Показатели оперативного реагирования и тушения пожаров подразделениями ГПС МЧС России как характеристики эффективности их деятельности // Интерактивная наука 2023, № 2 (78). С.19-21.
4. Харин В.В., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Кондашов А.А. Сравнительный анализ показателей оперативного реагирования подразделений различных видов пожарной охраны // Научно-аналитический журнал: «Сибирский пожарно-спасательный вестник», 2019. № 2 (13). С.54-58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38585938>
5. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: Статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2019, - 125 с.: ил. 42.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: Статистический сборник / Полехин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Четчина Т.А.. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2021. - 112 с.: ил. 5
7. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. Балашиха: П 46 ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
8. Штерензон В.А., Худякова С.А., Шпаньков А.В. Влияние индекса промышленного производства на основные показатели обстановки с пожарами в Российской Федерации // Техносферная безопасность. 2023. №1(38). С.18-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50488399>
9. Штерензон В.А., Худякова С.А., Степанов О.И., Гренадеров А.Н. Влияние индекса качества жизни на основные показатели обстановки с пожарами в Российской Федерации. // Техносферная безопасность. 2021. №4(33). С.56-66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47599900>
10. Штерензон В.А., Худякова С.А., Степанов О.И., Гренадеров А.Н. Факторы пожарной опасности регионов Российской Федерации. // Техносферная безопасность. 2020. №4(29). С.89-101. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44511453>
11. Время сообщения о пожаре. [Электронный ресурс] . URL: <https://fireman.club/enciklopediya-pozharnoj-bezopasnosti/> (дата обращения 25.10.2023 г.).
12. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». [Электронный ресурс] . URL: <https://01.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/dopolnitelnye-stranicy/staticheskie-stranicy/poleznaya-informaciya/vremya-pribytiya-10-min-i-20-min> (дата обращения 25.10.2023 г.).
13. Ликвидация пожара. Термины МЧС России. [Электронный ресурс]. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2447#:~> (дата обращения 25.10.2023 г.).

REFERENCES

1. Prompt response to an emergency. Terms EMERCOM of Russia. [Electronic resource]. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/3106> (accessed 25.10.2023). (rus).
2. Mashtakov V.A., Bobrinev E.V., Udavtsova E.Yu., Kondashov A.A. Comparison of operational response indicators of fire departments of territories located in different climatic conditions. Actual issues of fire safety. 2021; 4(10):6–10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50520000> DOI: [10.34987/2712-9233.2023.50.54.005](https://doi.org/10.34987/2712-9233.2023.50.54.005) (rus).
3. Romanova O.Yu. Indicators of prompt response and fire extinguishing by units of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia as characteristics of the effectiveness of their activities. Interactive Science. 2023; 2(78):19–21. (rus).
4. Kharin V.V., Bobrinev E.V., Udavtsova E.Yu., Kondashov A.A. Comparative analysis of operational response indicators of divisions of various types of fire protection. Scientific and analytical journal: "Siberian Fire and Rescue Bulletin". 2019; 2(13):54–58. (rus).
5. Fires and fire safety in 2018: Statistical compendium. Under the general editorship of D.M. Gordienko. Moscow, VNIPO, 2019; 125. (rus).

6. Fires and fire safety in 2020: Statistical collection /, Goncharenko V.S., Chechetina T. A. Under the general editorship of D.M. Gordienko. M.: VNIPO, 2021. 112 p.: ill. 5.
7. Polekhin P.V., Chebukhanov M.A., Kozlov A.A., Firsov A.G., Sibirko V.I. Fires and fire safety in 2021: an extra. Sat. Balashikha: P 46 FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2022; 114. (rus).
8. Shterenzon V.A., Khudyakova S.A., Shpankov A.V. Influence of the industrial production index on the main indicators of the situation with fires in the Russian Federation. Technosphere safety. 2023; 1(38):18–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50488399> (rus).
9. Shterenzon V.A., Khudyakova S.A., Stepanov O.I., Grenaderov A.N. The influence of the quality of life index on the main indicators of the situation with fires in the Russian Federation. Technosphere safety. 2021; 4(33):56–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47599900> (rus).
10. Shterenzon V.A., Khudyakova S.A., Stepanov O.I., Grenaderov A.N. Factors of fire danger in the regions of the Russian Federation. // Technosphere safety. 2020. No.4(29). pp.89-101. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44511453> (rus).
11. The time of the fire notification. [Electronic resource] . URL: <https://fireman.club/enciklopediya-pozharnoj-bezopasnosti/> (accessed 10/25/2023) (rus).
12. Federal Law of the Russian Federation No. 123-FZ dated July 22, 2008 "Technical Regulation on Fire Safety Requirements". [Electronic resource] . URL: <https://01.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/dopolnitelnye-stranicy/staticheskie-stranicy/poleznaya-informaciya/vremya-pribytiya-10-min-i-20-min> (date of application 10/25/2023) (rus).
13. Fire elimination. Terms of the Ministry of Emergency Situations of Russia. [electronic resource]. URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2447#:~> (accessed 10/25/2023) (rus).

Информация об авторах

Штерензон Вера Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 660374; ORCID 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.shterenzon@gmail.com

Худякова Светлана Александровна, кандидат педагогических наук, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 788349; ORCID 0000-0001-8721-5677; e-mail: hudyakova@gmail.ru

Шпаньков Андрей Владимирович, старший преподаватель, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 851206; e-mail: shpankov_andrey@mail.ru

Information about the authors

Vera A. Shterenzon, Cand. Sci. in Engineering, Associate professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Mira Str.19, Russia, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 660374; ORCID: 0000-0001-5265-9489; e-mail: v.shterenzon@gmail.com

Svetlana A. Khudyakova, Cand. Sci. (Pedagogy.), Associate professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 788349, ORCID 0000-0001-8721-5677; e-mail: hudyakova@gmail.ru

Andrey V. Shpankov, Senior Lecturer, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 851206; e-mail: shpankov_andrey@mail.ru

УДК: 614.841.4

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРЫ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Корнилов Алексей Александрович, Бородин Александр Александрович

АО «Эридан», г. Березовский, Свердловская область, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе сделано предположение о возможности оценки времени срабатывания пожарных извещателей с учетом изменения параметров горючей нагрузки на начальной стадии пожара. Приведены результаты экспериментального исследования, демонстрирующего на начальной стадии возгорания постепенное увеличение линейной скорости распространения пламени. Приведены результаты численного моделирования, показывающие существенные колебания температуры на начальной стадии пожара, отличающейся от температурного режима при стандартных испытаниях извещателей. Принимая во внимание допущение о равномерно возрастающей линейной скорости распространения пламени, была проведена расчетная оценка времени срабатывания дифференциального теплового пожарного извещателя с адаптивным алгоритмом анализа температуры. В результате расчетной оценки определено, что для пожарной нагрузки в виде хвойных пиломатериалов время его обнаружения дифференциальным пожарным извещателем при линейно возрастающей скорости распространения пламени в 4-6 раз больше, чем при постоянном справочном значении, что заметно увеличивает время начала эвакуации при расчете пожарного риска. В обоих случаях дифференциальный тепловой пожарный извещатель с адаптивным алгоритмом анализа позволяет обеспечить обнаружение пожара на более ранней стадии даже с учетом неравномерного роста температуры.

Ключевые слова: пожарная сигнализация, тепловой пожарный извещатель, адаптивный алгоритм анализа температуры, линейная скорость распространения пламени, моделирование пожара

EVALUATION OF THE RESPONSE TIME OF THE MAXIMUM DIFFERENTIAL THERMAL FIRE DETECTOR WITH AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR TEMPERATURE ANALYSIS AT THE INITIAL STAGE OF A FIRE OF SOLID COMBUSTIBLE MATERIALS

Aleksej A. Kornilov, Aleksandr A. Borodin

JSC «E`ridan», Berezovskij, Sverdlovsk region, Russian Federation

ABSTRACT

The paper makes an assumption about the possibility of estimating the response time of fire detectors, taking into account changes in the parameters of the combustible load

at the initial stage of the fire. The results of an experimental study demonstrating a gradual increase in the linear velocity of flame propagation at the initial stage of ignition are presented. The results of numerical modeling are presented, showing significant temperature fluctuations at the initial stage of the fire, which differs from the temperature regime during standard tests of detectors. Taking into account the assumption of a uniformly increasing linear flame propagation velocity, a calculated estimate of the response time of a differential thermal fire detector with an adaptive temperature analysis algorithm was carried out. As a result of the calculated assessment, it was determined that for a fire load in the form of coniferous lumber, the time of its detection by a differential fire detector with a linearly increasing flame propagation velocity is 4-6 times greater than with a constant reference value, which significantly increases the time of evacuation when calculating fire risk. In both cases, a differential thermal fire detector with an adaptive analysis algorithm allows for fire detection at an earlier stage, even taking into account uneven temperature increases.

Keywords: fire alarm system, thermal fire detector, adaptive analysis algorithm, linear flame propagation velocity, fire simulation

Согласно Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [1], одним из способов защиты людей и имущества является устройство систем пожарной сигнализации. Согласно п. 6.1.1 СП 484.1311500.2020 [2], в число задач системы пожарной сигнализации (СПС) входят:

- своевременное обнаружение пожара;
- достоверное обнаружение пожара;
- сбор, обработка и представление информации дежурному персоналу;
- взаимодействие с другими (при их наличии) системами противопожарной защиты.

Оценка своевременности обнаружения пожара является весьма непростой задачей для проектировщика систем автоматической противопожарной защиты (АПЗ), поскольку на стадии выбора средств обнаружения пожара необходимо учитывать сложный комплекс факторов и условий. И нельзя не согласиться с автором [3] в том, что заказчик АПЗ стремится к уверенности, что реализованные по всем нормам и правилам системы гарантируют предотвращение пожара с ощутимыми

убытками. Однако существующие стандарты не могут предугадать все возможные виды объектов, а методы сертификационных испытаний – все варианты динамики параметров, контролируемых средствами обнаружения пожара. Поэтому проектировщику могут быть полезны сведения об эффективности применяемых им технических средств в конкретных условиях.

В практику проектирования противопожарной защиты все больше входит применение различных расчетных обоснований. Так, в новой редакции методики расчета пожарного риска [4], применяемой для обоснования отступлений от требований нормативных документов по пожарной безопасности, время обнаружения пожара необходимо оценивать расчетным путем. Ключевым соотношением в расчете пожарного риска является выполнение условия безопасной эвакуации для определения вероятности эвакуации людей. При этом время начала эвакуации для зданий, оборудованных системой пожарной сигнализации, определяется по формуле:

$$t_{н.э.} = t_{пор} + t_{инерц}^{обн} + t_{задерж}^{СОУЭ} + t_{предв} \quad (1)$$

где $t_{\text{пор}}$ – время достижения порогового значения срабатывания пожарного извещателя, определяемое расчетным путем, с;

$t_{\text{инерц}}^{\text{обн}}$ – время задержки, связанное с инерционностью системы обнаружения пожара, с;

$t_{\text{задерж}}^{\text{СОУЭ}}$ – время задержки, связанное с задержкой оповещения людей при пожаре, с;

$t_{\text{предв}}$ – время проведения предварительных действий, предшествующих началу эвакуации.

Сценарий возникновения пожара и эвакуации выбирается исходя из создания наихудших условий с целью выявления сочетания наибольшего расчетного времени эвакуации и наименьшего необходимого времени эвакуации [4]. При этом характеристики горючей нагрузки, влияющие на динамику опасных факторов пожара, принимаются постоянными. Для определения времени срабатывания технических средств обнаружения пожара такой подход предполагает получение более оптимистичного результата. Однако практика разработки технических средств обнаружения пожара выявила необходимость обеспечения возможности обнаружения пожара с учетом реального режима,

поэтому возникло предположение о недоверности данного подхода и его расхождении с иными методиками расчетов в области пожарной безопасности. Например, предварительное планирование действий пожарных подразделений предполагает двукратное уменьшение линейной скорости распространения пожара в течение первых 10 минут [6, 7, 8]. Аналогичное условие предусмотрено в методике оценки возможности использования спринклерной автоматической установки пожаротушения (примечание 2 к таблице В.1 приложения В к СП 485.1311500.2020 [7]). Вопрос весьма актуален, ведь даже применение достигших высокой точности дифференциальных (полевых) моделей динамики опасных факторов пожара ограничивается достоверностью моделей горения пожарной нагрузки [9]. Для наглядной проверки предположения был проведен простой эксперимент на примере тестового очага аналогично ТП-1, который используется для испытания пожарных извещателей согласно [10]. Поскольку высота тестового очага значительно меньше длины и ширины, то основной областью распространения пламени будет горизонтальная плоскость. Схема измерительного стенда представлена на рис. 1.

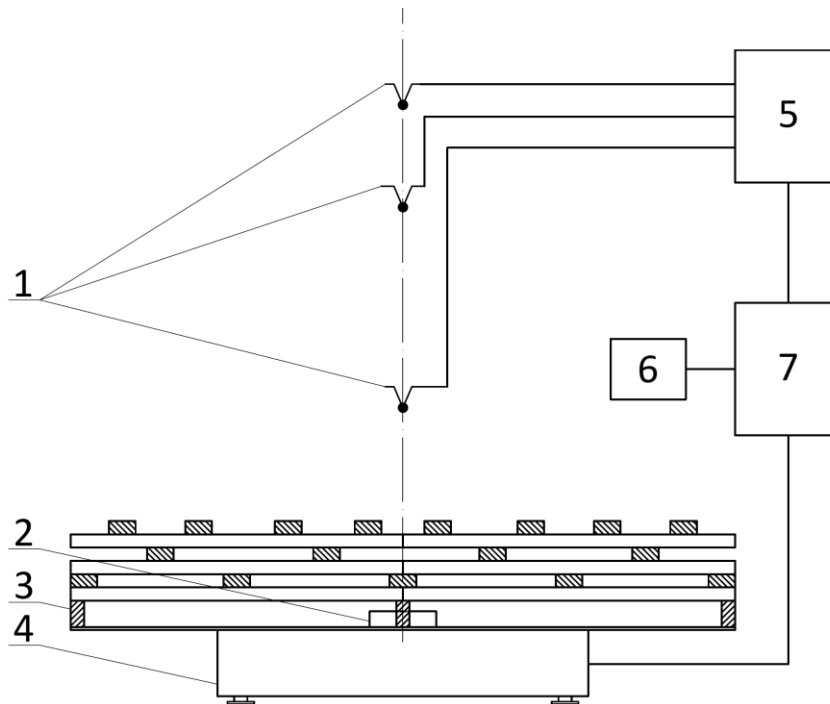


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

1 – термопары на высоте 0,2 м, 0,6 м и 0,9 м над очагом; 2 – емкость для горючей жидкости; 3 – тестовый очаг (70 брусков из сосны); 4 – электронные лабораторные весы; 5 – электронный самописец; 6 – видеокамера; 7 – запоминающее устройство

Fig. 1. Scheme of the experimental stand

1 – thermocouples at a height of 0.2 m, 0.6 m and 0.9 m above the hearth; 2 – a container for a flammable liquid; 3 – a test center (70 pine bars); 4 – electronic laboratory scales; 5 – an electronic recorder; 6 – a video camera; 7 – a storage device

Для розжига тестового очага использовался этиловый спирт. С момента воспламенения фиксировалась масса тестового очага и температура над ним, кроме того, осуществлялась фото и видеосъемка для последующего анализа изменения площади горения.

Известно [8, 9, 11], что скорость распространения пламени может зависеть от физических свойств материалов, их химического состава, геометрии, начальной температуры, способа разме-

щения и ориентации поверхности, направления распространения, плотности, теплоемкости, теплопроводности и других параметров. Поэтому целью эксперимента являлась лишь качественная оценка процесса; задача получения конкретных параметров, характеризующих интенсивность горения для данного вида и способа размещения пожарной нагрузки, не ставилась. Фото тестового очага в процесс испытания представлено на рис. 2.

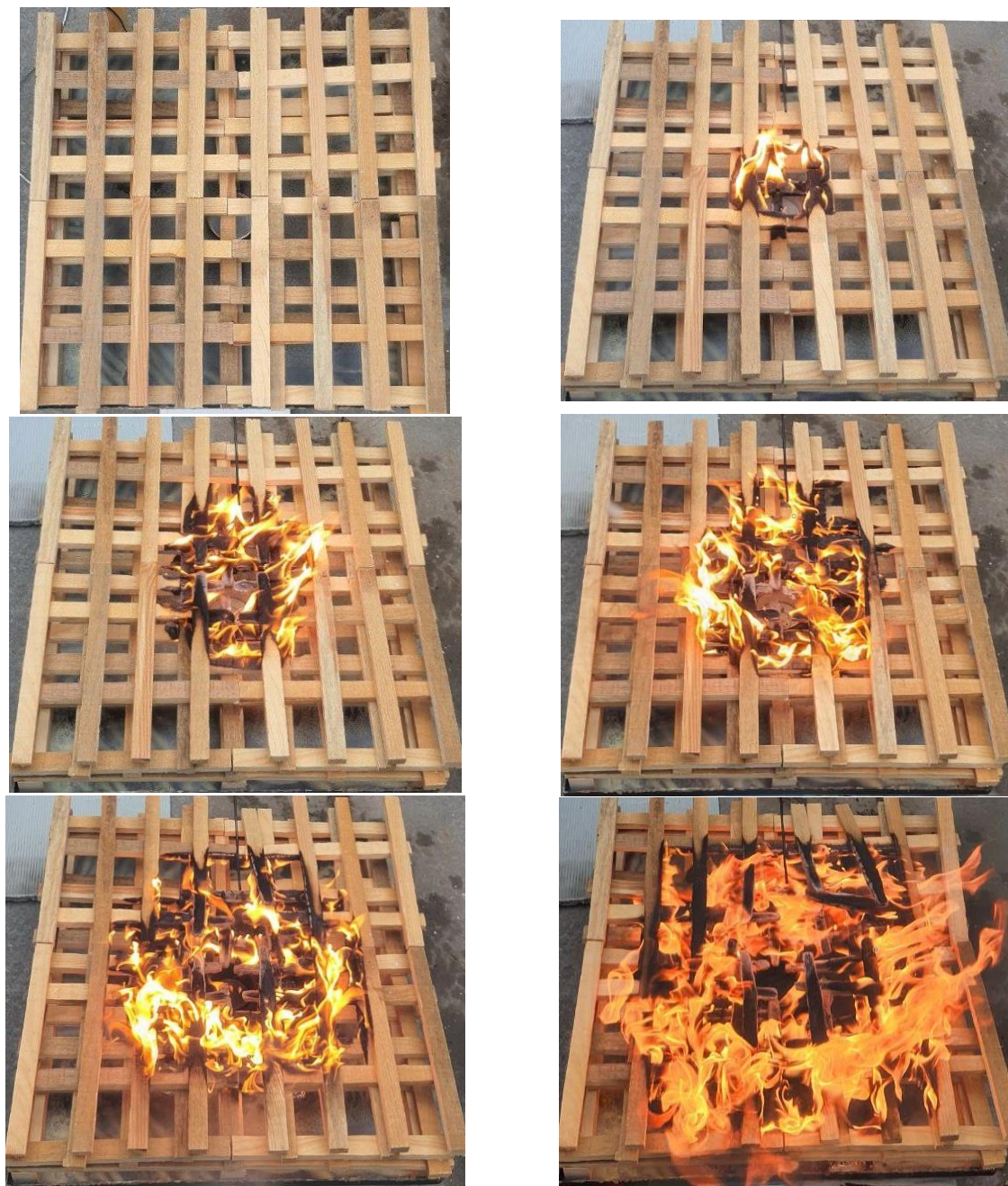


Рис. 2. Огневые испытания

Fig. 2. Fire tests

Масса сгоревшего горючего материала с течением времени представлена на рис. 3.

Поскольку площадь пожара в ходе испытаний могла принимать форму эллипса, то эквивалентный радиус пожара определялся по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{F_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \frac{d_1}{2} \cdot \frac{d_2}{2}}{\pi}} = 0,5\sqrt{d_1 \cdot d_2}, \quad (2)$$

где r – радиус пожара тестового очага, м;

F_3 – площадь пожара в форме эллипса, м²;

d_1, d_2 – диаметры площади пожара тестового очага, м.

Оценка линейной скорости распространения пламени v_l проводилась с момента, когда горение легковоспламеняющейся жидкости прекратилось, время ее полного выгорания составило 3,5 мин.

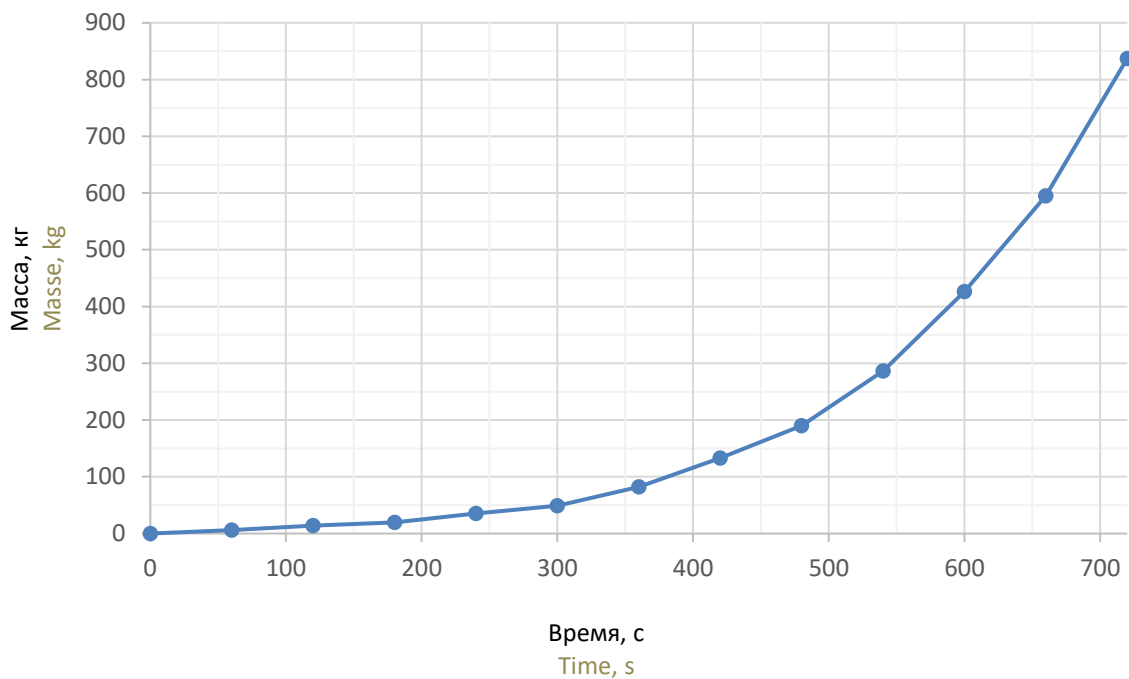


Рис. 3. Масса выгоревшего горючего материала
Fig. 3. Mass of burnt-out combustible material

Линейная скорость распространения пламени оценивалась двумя способами (рис. 4):

- на отрезке времени:

$$v'_{ли} = \frac{r_i - r_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} \quad (3)$$

- нарастающим итогом:

$$v_{ли} = \frac{r_i - r_4}{\tau_i - 4} \quad (4)$$

где r_i, r_{i-1}, r_4 – радиус очага пожара на момент времени соответственно τ_i, τ_{i-1} и $\tau = 4$ мин (время, когда горение легковоспламеняющейся жидкости гарантированно прекратилось), м.

Удельная массовая скорость выгорания с единицы площади поверхности брусков $\Psi_{уд}$ на каждом отрезке времени оценивалась приблизительно с учетом того, что горение в объеме тестового очага принимало форму цилиндра, 70 брусков распределены по площади равномерно согласно [10] (рис. 5).

На основании данных рис. 4 и 5 можно сделать вывод об устойчивом росте линейной скорости распространения пламени и относительной стабильности удельной массовой скорости выгорания. Таким образом, опираясь на допущение о том, что в течение первых десяти минут линейная скорость распространения пламени равномерно возрастает, можно сформулировать упрощенный подход к выбору исходных данных при моделировании температурного режима для последующего прогнозирования времени срабатывания пожарного извещателя (рис. 6). Хотя, основываясь на данных [8, 11, 12], более точным представляется предположение об экспоненциальном росте линейной скорости. В любом случае нельзя не принимать во внимание, что все параметры, характеризующие выгорание пожарной нагрузки на начальной стадии пожара, носят вероятностный характер [9, 12].

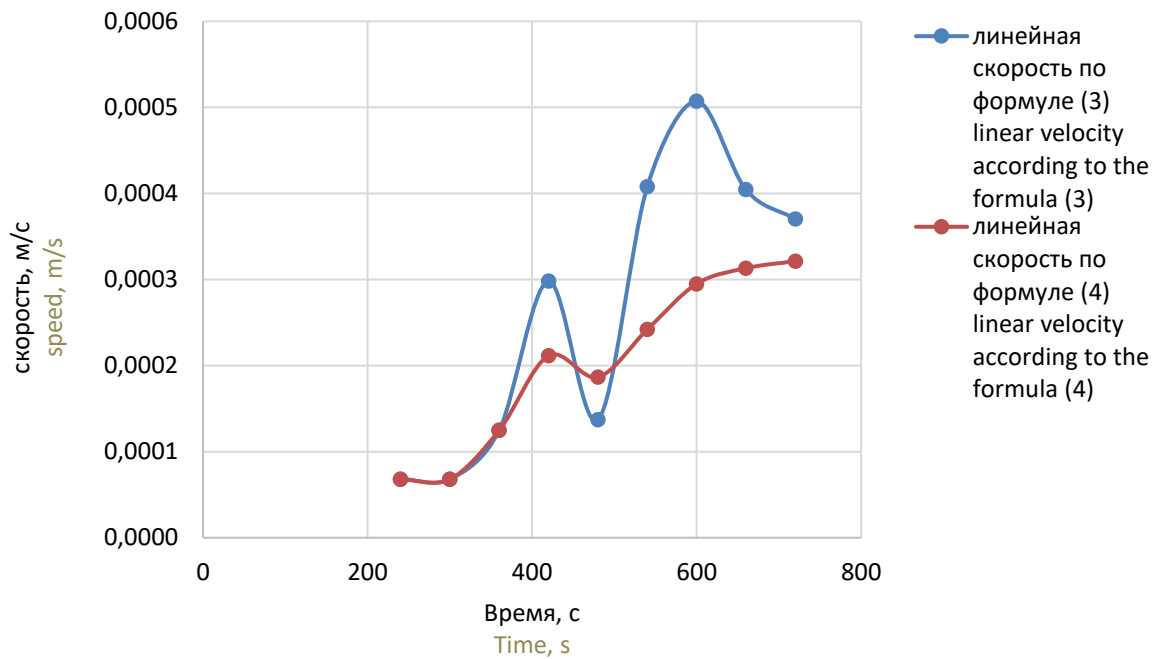


Рис. 4. Результаты анализа линейной скорости распространения пламени
Fig. 4. Results of the analysis of the linear velocity of fire propagation

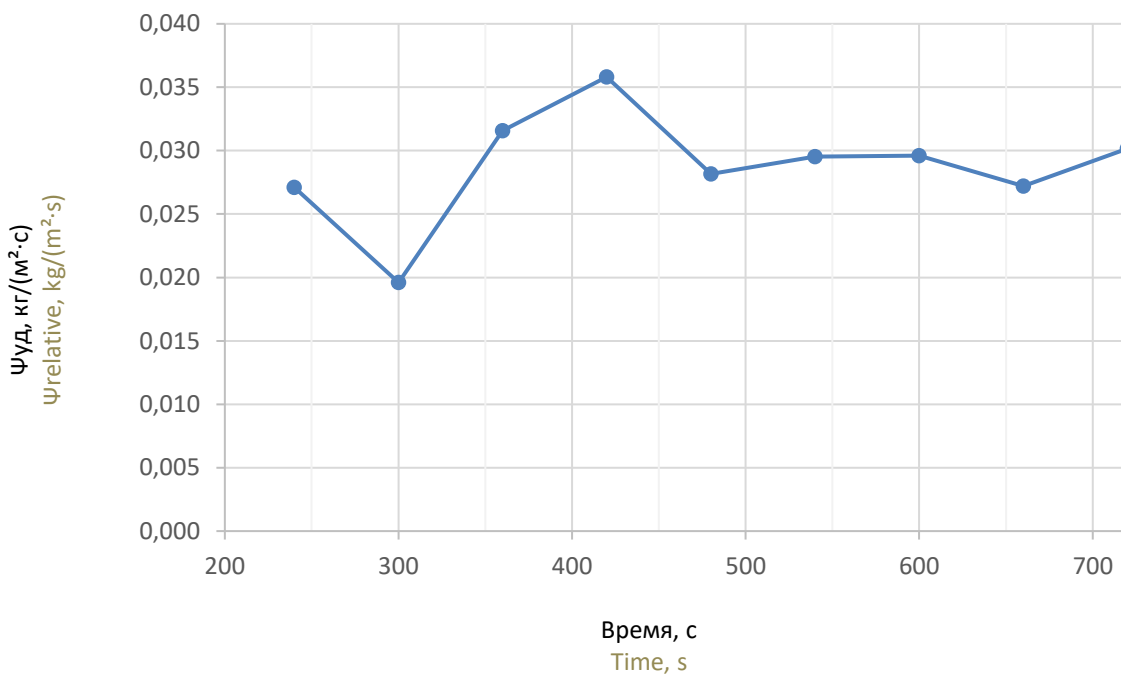


Рис. 5. Результаты анализа удельной массовой скорости выгорания древесины
Fig. 5. Results of the analysis of the specific mass rate of wood burning

В качестве примера пожарной нагрузки выбраны хвойные древесные строительные материалы, для которых

линейная скорость распространения пламени v_l согласно [13], принимается равной 0,0585 м/с.

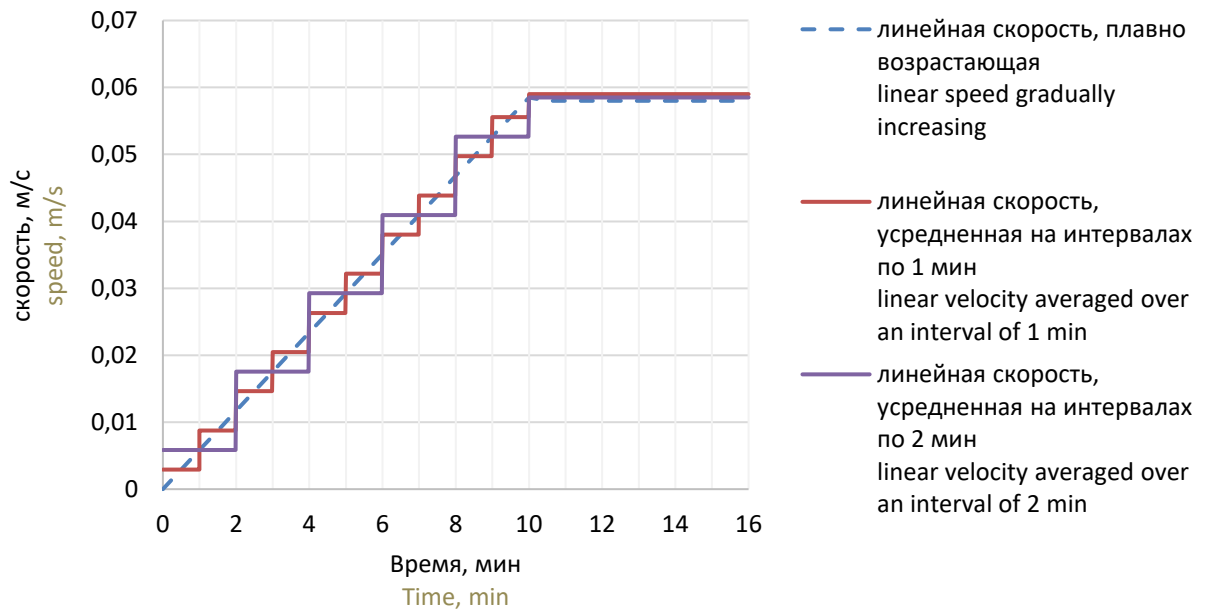


Рис. 6. Линейная скорость распространения пламени на начальной стадии пожара для упрощенного численного моделирования

Fig. 6. Linear flame propagation velocity at the initial stage of a fire for simplified numerical simulation

Для сравнения сопоставим динамику площади пожара при полной справочной скорости распространения, а также

с учетом допущения половинной и равномерно увеличивающейся скорости (рис. 7).

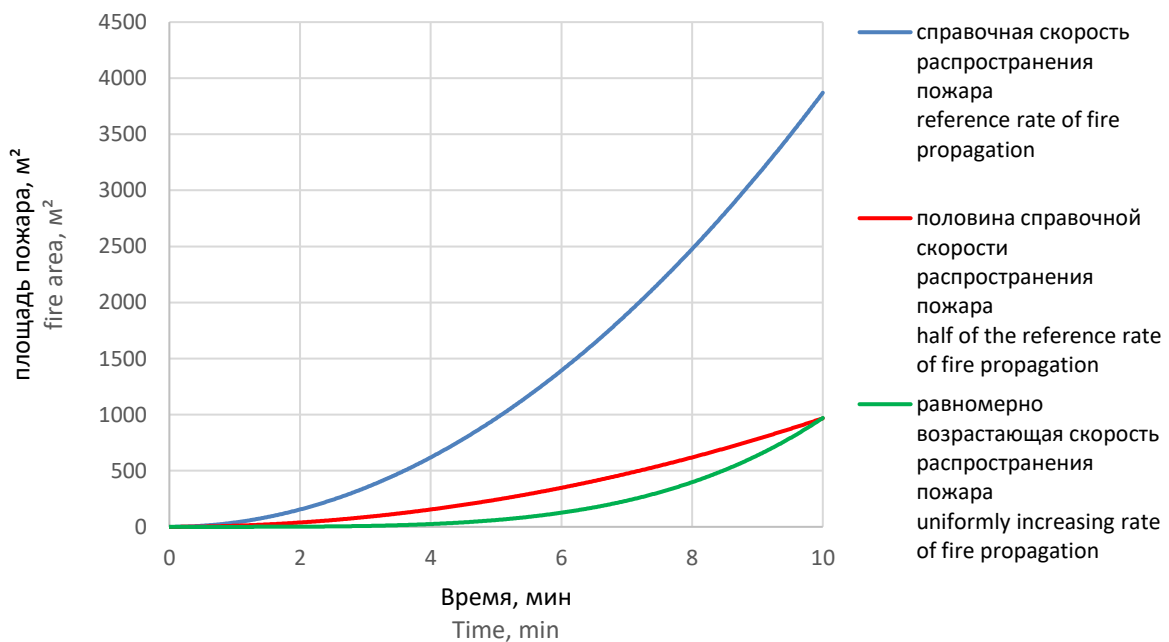


Рис. 7. Динамика площади пожара линейная скорость распространения пламени на начальной стадии пожара

Fig. 7. Linear velocity of flame propagation at the initial stage of a fire

По данным рис. 7 площадь пожара при половинной и линейно возрастающей скорости распространения пламени по истечении 10 мин (периода допущения) принимают равные значения, но на начальной стадии отличаются весьма существенно. Таким образом, условие линейно возрастающей скорости распространения пламени для оценки времени срабатывания извещателя можно считать наилучшим.

Согласно рис. 6 для оценки времени срабатывания извещателя в течение первой минуты можно принять линейную скорость распространения пламени равную среднему значению скорости в течение первой минуты – 0,05в/л, для периода времени в течение первых двух минут – 0,1в/л. Для сравнения автором [9] приводятся результаты эксперимента с горением штабеля древесины, для которого фактическая линейная скорость распространения пламени составила 0,00666 м/с, что приблизительно равно 0,11в/л от справочной величины [13].

Для оценки интенсивности роста температуры выполнено численное моделирование в программном комплексе Fire Dynamics Simulator для помещения размерами в плане 20×20 м и высотой 3,5 м, в качестве горючей нагрузки выбраны хвойные древесные строительные материалы [13]. Извещатели равноудалены от очага пожара и расположены на расстоянии 5 м друг от друга в соответствии с требованиями [2], очаг расположен в центре помещения (рис. 8). Расчет проводился последовательно для двух вариантов с учетом предполагаемого времени срабатывания в течение первой или второй минуты развития пожара, в этом случае линейная скорость распространения пламени принималась равной 0,05в/л и 0,1в/л соответственно, площадь размещения горючей нагрузки не ограничивала распространение в течение периода моделирования (рис. 8).

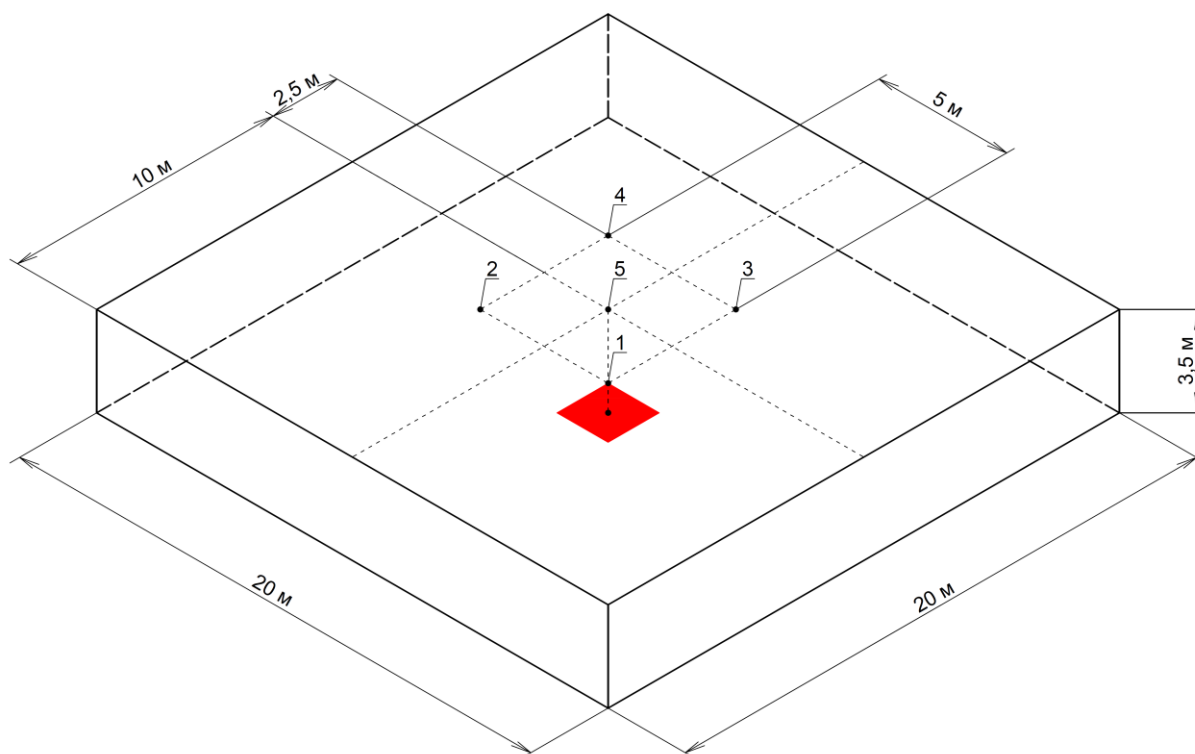


Рис. 8. Схема размещения расчетных точек

Fig. 8. Layout of settlement points

Размещение извещателя в точке 5 (непосредственно над очагом) является фактически наилучшим условием для его срабатывания, поэтому можно говорить о том, что время обнаружения пожара бу-

дет находиться в диапазоне между временем срабатывания в точке 5 и точках 1–4. Графики температур для расчетных точек для каждого варианта приведены на рис. 9 и 10.

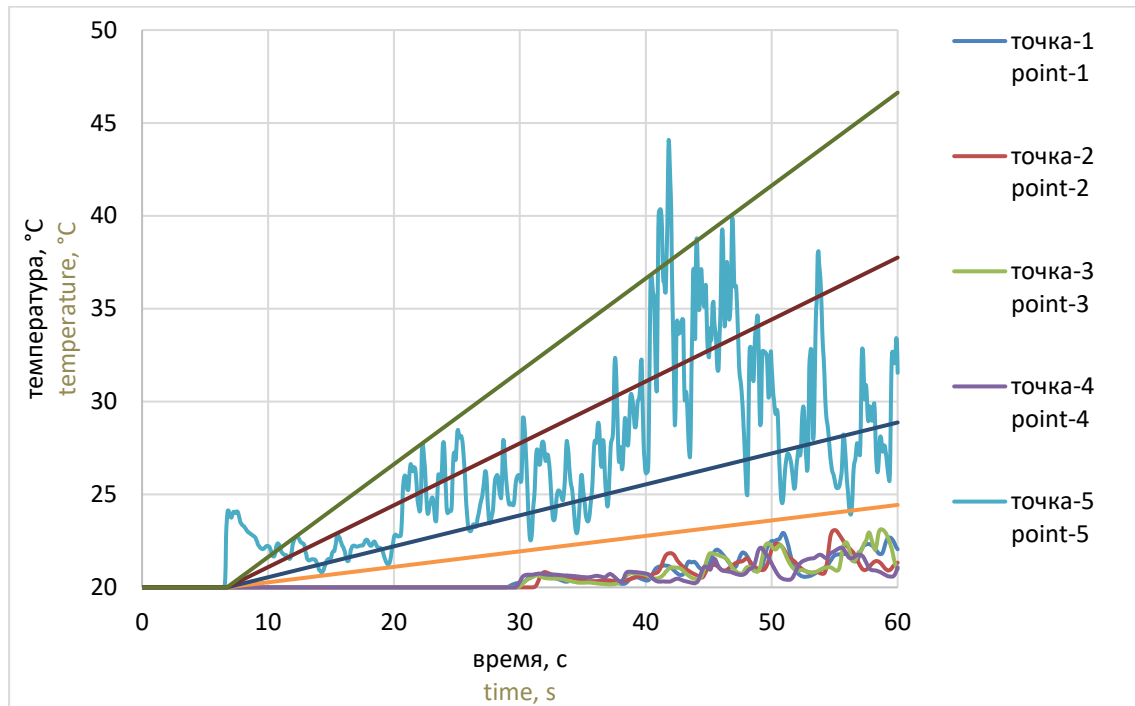


Рис. 9. Динамика температуры в контрольных точках при линейной скорости распространения пламени, равной 5 % от табличного значения

Fig. 9. Temperature dynamics at control points at a linear flame propagation velocity equal to 5% of the table value

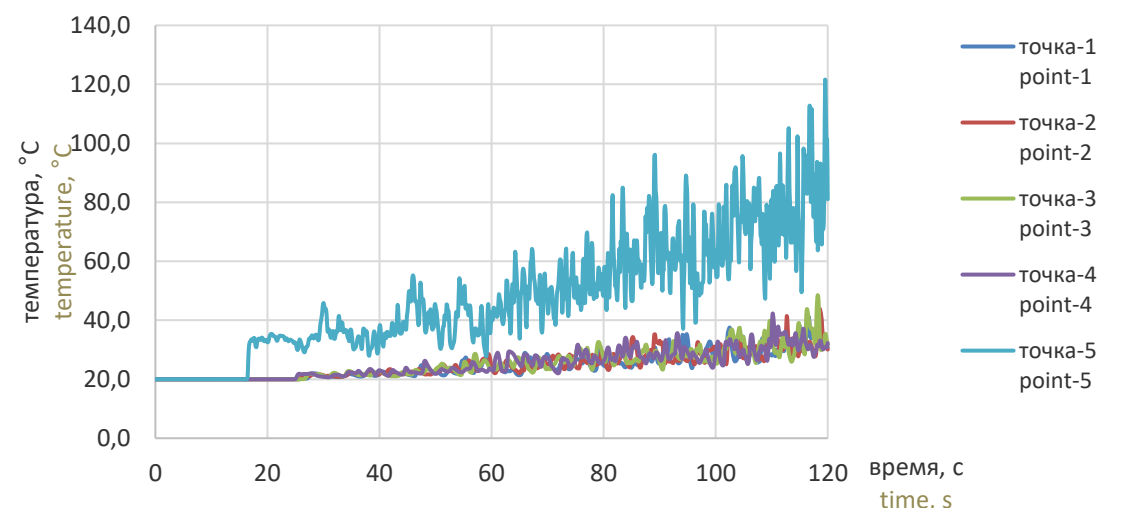


Рис. 10. Динамика температуры в контрольных точках при линейной скорости распространения пламени, равной 10 % от табличного значения

Fig. 10. Temperature dynamics at control points at a linear flame propagation velocity equal to 10% of the table value

Результаты численного моделирования наглядно демонстрируют еще одну особенность динамики температуры на начальной стадии пожара, а именно: существенные колебания с сохранением тенденции к росту. Если сопоставить расчетные значения со стандартными режимами испытания дифференциальных тепловых извещателей согласно [10], при которых создается равномерный рост температуры со скоростями от 5 до 30 °С/мин, то можно заметить, что режим реального пожара может существенно отличаться от стандартных кривых даже без учета неравномерного выгорания пожарной нагрузки.

Также по результатам огневых испытаний (рис. 11) рост температуры не был столь стремительным, как это демонстрируют результаты численного моделирования с полной линейной скоростью распространения пламени, что также может быть обусловлено небольшой удельной пожарной нагрузкой (около 110 МДж/м²). На рис. 11 в течение первых 210 МДж/м²с происходило выгорание спирта для розжига тестового очага, только спустя примерно 480 МДж/м² с наблюдался устойчивый рост температуры, обусловленный исключительно горением древесины.



Рис. 11. Результаты измерения температуры на высоте 0,6 м и 0,9 м над тестовым очагом при огневых испытаниях

Fig. 11. The results of temperature measurement at a height of 0,6 m and 0,9 m above the test hearth during fire tests

Данный отрезок времени можно условно отнести к периоду «загорания», по мнению автора [3] представляющего собой теплофизический процесс, возникший в результате занесения высокотемпературного микро-мини источника в горючую среду, способный генерировать в окружающую среду тепло, продукты горения и открытое пламя, тепловая мощность которого еще не способна причинять

ущерб материальным ценностям или угрожать жизнедеятельности человека, но в определенных условиях окружающей среды склонный к развитию во времени по тепловой мощности и площади горения до величины, вызывающей пожар, уже причиняющий ущерб материальным ценностям и угрожающий жизнедеятельности людей. Экспериментальная скорость роста температуры над очагом заметно меньше

моделируемой с полной линейной скоростью распространения пламени, что приведет к большему времени срабатывания пожарного извещателя. Безусловно, все зависит от конкретных условий, сложившихся на объекте защиты, и фактический сценарий будет где-то между условно наилучшим и наихудшим, но представляется целесообразным заведомо подготовить и оценить способность пожарного извещателя к реагированию на изменение контролируемого параметра при нестационарных параметрах очага пожара. Если алгоритмом анализа температуры предусмотрена аппроксимация с помощью линейной функции, то это может повлечь существенное искажение результатов измерения (рис. 9). В случае, если алгоритм анализа основан только на сравнении текущей температуры со средним значением до начала пожара, то вывод о выполнении критерия срабатывания (повышения температуры на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью не ниже $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) может носить нестабильный характер. Чтобы избежать этого и нивелировать влияние нестационарного температурного режима на принятие решения о пожаре был разработан адаптивный алгоритм анализа температуры [14], позволяющий отслеживать колебания температуры, оценивать их соответствие возможной динамике роста температуры на начальной стадии пожара и делать вывод на основе оценки совокупности не одного, а целого ряда измерений с момента начала роста температуры. В этом случае испытания при стандартных режимах нагрева [10] являются частным случаем динамики температуры реального пожара. Адаптивный алгоритм анализа температуры был реализован в программе микроконтроллера максимально-дифференциального извещателя ИП101-07а [14].

Время срабатывания максимально-дифференциального теплового извещателя с адаптивным алгоритмом анализа [14, 15] при размещении в указанных расчетных точках с учетом и без учета допущения о нарастающей линейной скорости распространения пламени представлено в табл. 1.

Согласно данным рис. 9 срабатывание в течение первой минуты происходит непосредственно над очагом пожара (точка 5). Таким образом, можно сделать вывод о том, что срабатывание максимально-дифференциального извещателя с адаптивным алгоритмом анализа температуры [14, 15] для рассматриваемого сценария с учетом допущения равномерного увеличения линейной скорости распространения пламени (реализующем неблагоприятные условия для срабатывания) происходит в течение 41–108 с при расчетной площади пожара от $0,05\text{ м}^2$ до $1,3\text{ м}^2$ соответственно. Для полной скорости распространения пламени расчетное время срабатывания составляет 9–18 с. при расчетной площади пожара от $0,9\text{ м}^2$ до $3,5\text{ м}^2$. То есть время обнаружения дифференциальным извещателем при равномерно увеличивающейся линейной скорости распространения пламени в 4–6 раз больше, чем при постоянном справочном значении, что заметно увеличивает время начала эвакуации по формуле (1). В обоих случаях дифференциальный тепловой пожарный извещатель позволяет обеспечить реагирование существенно раньше максимального, что подтверждается, например, авторами [16] на основании анализа большого количества видов пожарной нагрузки при постоянном справочном значении линейной скорости распространения пламени.

Таблица 1

Расчетное время срабатывания максимально-дифференциального извещателя с адаптивным алгоритмом анализа температуры [14, 15] и допущением увеличения линейной скорости распространения пламени

Table 1

The estimated response time of the maximum differential detector with an adaptive temperature analysis algorithm [14, 15] and the assumption of an increase the linear velocity of flame propagation

Расчетная Точка Settlement point	с учетом допущения увеличения линейной скорости распространения taking into account the assumption of an increase in the linear velocity of propagation		с учетом постоянной линейной скорости распространения taking into account the constant linear velocity of propagation	
	среднее время срабатывания, с average response time, s	площадь пожара к моменту срабатывания, м ² the area of the fire at the time of operation, m ²	среднее время срабатывания, с average response time, s	площадь пожара к моменту срабатывания, м ² the area of the fire at the time of operation, m ²
1 – 4	108	1,3	18	3,5
5	41	0,05	9	0,9

Таким образом, учитывая вероятностный характер параметров, влияющих на выгорание пожарной нагрузки, можно сказать, что представленные в таблице 1 данные, с одной стороны, лишь очерчивают разброс искомых величин, с другой

стороны, позволяют приблизиться к построению эффективной системы противопожарной защиты объекта при более скрупулезном подходе к оценке характеристик технических средств обнаружения пожара и условий их применения на объекте защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (послед. ред.) // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: ivo.garant.ru/#/document/12161584/ (дата обращения: 21.11.2023).
2. СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования.
3. Шаровар Ф. И. О технологиях гарантированного предотвращения пожаров // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 5 (63). С. 60–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26249904> (дата обращения: 21.11.2023).
4. 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 // КонсультантПлюс : сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_442656/ (дата обращения: 21.11.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
5. Повзик Я. С. Пожарная тактика. М., 2004. 416 с.
6. Тербенев В. В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. М., 2004. 256 с.

7. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
8. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учебное пособие. М., 1980. 255 с.
9. Молчадский И. С. Пожар в помещении. М., 2005. 456 с.
10. ГОСТ 34698–2020. Извещатели пожарные. Общие технические требования : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 29 июня 2021 г. № 598-ст : дата введения 2023-07-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180194> (дата обращения: 21.11.2023).
11. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. К. Г. Бомштейна ; под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. М., 1990. 424 с.
12. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко и др. ; под. ред. Ю. А. Кошмарова. М., 1988. 448 с.
13. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М., 2000. 118 с.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683265 Российская Федерация : заявл. 24.10.2023 : зарегистрир. 07.11.2023 / Корнилов А. А., Бородин А. А., Шульгин И. В., Шлыков Е. Д., Долговых К. С. ; правообладатель АО «ЭРИДАН».
15. ИП101-07a-RS. Извещатель пожарный тепловой взрывозащищенный программируемый адресный // АО «Эридан» : сайт. URL: <https://eridan.ru/catalog/product/ip101-07a-rs/> (дата обращения: 21.11.2023).
16. Субачев С. В., Субачева А. А. Анализ расчетных величин времени начала эвакуации, определяемых по новой методике оценки пожарного риска, для помещений с различной горючей нагрузкой // Техносферная безопасность. 2023. № 3 (40). С. 44–55. URL: [https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%203%20\(40\)/5.pdf](https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%203%20(40)/5.pdf) (дата обращения: 21.11.2023).

REFERENCES

1. Technical Regulations on Fire safety requirements: Federal Law No. 123-FZ of 22.07.2008 // Garant.ru: information and legal portal. URL: ivo.garant.ru/#/document/12161584/ (date of application: 21.11.2023). (rus).
2. SP 484.1311500.2020. Fire protection systems. Fire alarm systems and automation of fire protection systems. Norms and rules of design. (rus).
3. Sharovar F.I. About technologies of guaranteed fire prevention. Technosphere safety technologies. 2015; 5(63): 60–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26249904> (date of application: 21.11.2023). (rus).
4. Order of the Emercom of Russia dated 14.11.2022 no. 1140 «On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard». (rus).
5. Povzik Ya.S. Fire tactics. Moscow, ZAO «SPECZTEKNIKA», 2004; 416. (rus).
6. Terebenev V.V. Directory of the fire extinguishing manager. Tactical capabilities of fire departments. Moscow, Pozhkniga, 2004; 256. (rus).
7. SP 485.1311500.2020. Fire protection systems. Fire extinguishing installations are automatic. Norms and rules of design. (rus).
8. Abduragimov I.M., Govorov V.Yu., Makarov V.E. Physico-chemical foundations of the development and extinguishing of fires: textbook. Moscow, Higher Engineering Fire-technical School. 1980; 255. (rus).
9. Molchadskij I.S. Indoor fire. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
10. GOST 34698-2020. Interstate standard. Fire detectors. General technical requirements. Test methods. Fire detectors. General technical requirements. Test methods (date of application: 2023-07-01). (rus).
11. Drajzdel D. Introduction to the dynamics of fires / Per. s angl. K.G. Bomshtejna; pod red. Yu.A. Koshmarova, V.E. Makarova. Moscow, Strojizdat. 424. (rus).
12. Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Molchadskij I.S., Shevlyakov A.N. Thermal and gas dynamics of indoor fires. Moscow, Strojizdat, 1988; 448. (rus).
13. Koshmarov Yu.A. Forecasting of fire hazards in the room: A textbook. Moscow, AGPS MVD Of Russia, 2000; 118. (rus).
14. Certificate of state registration of a computer program № 2023683265 Russian Federation: declared 24.10.2023: registered 07.11.2023 / Kornilov A.A., Borodin A.A., Shul`gin I.V., Shly`kov E.D., Dolgov`x K.S.; copy-right holder AO «E`RIDAN». (rus).
15. IP101-07a-RS. Fire detector thermal explosion-proof programmable addressable. URL: <https://eridan.ru/catalog/product/ip101-07a-rs/> (date of application – 21.11.2023). (rus).

16. Subachev S.V., Subacheva A.A. Analysis of the calculated values of the evacuation start time determined by the new fire risk assessment methodology for rooms with different combustible loads. *Technosphere safety*. 2023; 3(40):44–55. URL: [https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%203%20\(40\)/5.pdf](https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%203%20(40)/5.pdf) (date of application: 21.11.2023). (rus).

Информация об авторах

Корнилов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент. Главный специалист по пожарной безопасности, АО «Эридан». Россия, 623704, Свердловская область г. Березовский, ул. Транспортников, стр. 43;

РИНЦ ID: 716627; Scopus Author ID: нет; Re-searcher ID: нет; ORCID:

e-mail: a.kornilov@eridan.ru

Бородин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент. Руководитель группы «Системные решения», АО «Эридан». Россия, 623704, Свердловская область г. Березовский, ул. Транспортников, стр. 43;

РИНЦ ID: 716150; Scopus Author ID: нет; Re-searcher ID: нет; ORCID:

e-mail: a.borodin@eridan.ru

Information about the authors

Aleksej A. Kornilov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor. Chief Fire Safety Specialist, JSC «E`ridan». Transportnikov St., 43, Berezovskij, Sverdlovsk region, 623704, Russian Federation.

ID RISC: 716627; Scopus Author ID: none; Re-searcher ID: none; ORCID: none;

e-mail: a.kornilov@eridan.ru

Aleksandr A. Borodin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor. Head of the "System Solutions" group, JSC «E`ridan». Transportnikov St., 43, Berezovskij, Sverdlovsk region, 623704, Russian Federation.

ID RISC: 716150; Scopus Author ID: none; Re-searcher ID: none; ORCID: none;

e-mail: a.borodin@eridan.ru