УДК 614.844
DOI: https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2026.59.50.004
EDN: https://elibrary.ru/ryrfxp

ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА, ХРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ, РАЗЛАГАЮЩИХСЯ С ВЫСОКИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА И ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА

Леонид Петрович Вогман, Владимир Александрович Зуйков, Евгений Николаевич Простов, Наталья Борисовна Аверкина

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. Представлены системы автоматической противопожарной защиты, отличающиеся большим быстродействием и высокой эффективностью для подавления пожаров и взрывов в технологических процессах производства, хранения, эксплуатации оборудования при обращении в них веществ и материалов с высокими значениями показателей тепловыделения и давления взрыва при разложении. Установлены оптимальные расходные характеристики быстродействующих систем пожаротушения, конструкции распыляющих насадков, пламеотсекающих систем и способы тушения огнетушащим составом, в качестве которого выбрана распыленная вода. На основании этих исследований определены оптимальные соотношения между площадями очага горения и орошения водой, предельно допустимая регистрируемая датчиками площадь горения и другие факторы, характеризующие эффективность автоматического пожаротушения.

Ключевые слова: вещества и материалы, разложение, экзотермический эффект, давление взрыва, быстродействующая автоматическая пожаротушащая система, противопожарная защита

Для цитирования: Противопожарная защита технологических процессов производства, хранения веществ и материалов, разлагающихся с высокими значениями экзотермического эффекта и давления взрыва / *Л.П. Вогман, В.А. Зуйков, Е.Н. Простов, Н.Б. Аверкина* // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 4 (30). С. 30–37. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.59.50.004. EDN RYRFXP.

FIRE PROTECTION OF INDUSTRIAL PROCESSES FOR THE PRODUCTION AND STORAGE OF SUBSTANCES AND MATERIALS THAT DECOMPOSE WITH HIGH EXOTHERMIC EFFECTS AND HIGH EXPLOSION PRESSURE

Leonid P. Vogman, Vladimir A. Zuikov, Evgeny N. Prostov, Natalya B. Averkina

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. The paper presents automatic fire protection systems characterized by fast response and high efficiency in suppressing fires and explosions in industrial processes of production, storage, and operation of equipment when handling

substances and materials with high values of heat generation and explosion pressure during decomposition. Optimal flow characteristics of fast-response fire extinguishing systems, spray nozzle designs, flame-arresting systems, and extinguishing methods using a fire-extinguishing agent (sprayed water) have been established. Based on these studies, the optimal ratios between the combustion zone area and the water spray area, the maximum permissible burning area recorded by the sensors, and other factors characterizing the effectiveness of automatic fire suppression have been determined.

Keywords: substances and materials, decomposition, exothermic effect, explosion pressure, quick-response automatic fire suppression system, fire protection

For citation: Vogman L.P., Zuikov V.A., Prostov E.N., Averkina N.B. Fire protection of industrial processes for the production and storage of substances and materials that decompose with high exothermic effects and high explosion pressure. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2026, no. 4, pp. 30-37. (In Russ.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.59.50.004. EDN RYRFXP.

Введение

Пожаровзрывоопасность веществ и материалов, разлагающихся с высокими показателями экзотермического эффекта и давления взрыва

В последние годы большое внимания уделяется вопросам обеспечения предупреждения и тушения пожаров на объектах по производству и хранению веществ и материалов (пороха, конденсированные взрывчатые вещества (ВВ) и взрывчатые материалы (ВМ), пиротехнические составы, а также вещества с высоким тепловым эффектом реакции разложения и (или) внутреннего самоокисления), обращающиеся наобъектах химической промышленности и особенно на предприятиях органического синтеза. Эти вещества характеризуются высоким экзотермическим эффектом разложения, сопровождающегося выделением большого количества энергии в реакциях нитрования и полимеризации. Реакции нитрования характеризуются образованием неустойчивых, склонных к разложению продуктов, а в реакции полимеризации происходит изменение вязкости вещества, что приводит к снижению отвода тепла в процессе реакции, аккумуляции тепла и возможности реализации неконтролируемого роста температуры.

В настоящее время осуществляется пересмотр и обновление нормативной базы взрывопожарной опасности указанных объектов, совершенствуются средства и способы противопожарной защиты. Актуальность этой работы обусловлена, с одной стороны, вызовами, которые диктует новая политическая реальность, а с другой – далеко неспокойной статистикой пожаров и взрывов в ряде отраслей народного хозяйства.

В соответствии с приложениями 1 и 2 Федерального закона от 21 июля 1998 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», ВВ – это вещества, которые при определенных видах воздействия способны на очень быстрое самораспространяющееся химическое превращение с выделением тепла и образованием газов. Классификация ВВ и порохов [1–3] является определенным ориентиром в ранжировании уровня взрывоопасности, так как поведение ВВ зависит от условий, в которых они находятся, и способов их инициирования [3]. Их можно разделить на чрезвычайно опасные, первичные и вторичные (в том числе бризантные) ВВ. К последним можно также отнести дымные и бездымные пороха, а также пиротехнические изделия, в основном,

IV и V класса опасности в соответствии «Техническим регламентом о безопасности пиротехнических составов и содержащих их изделий (ТР ТС 006/2011 от 15.02.2012 г.). Регламент актуализирован 01.01.2019 г. Эти вещества по классификации ГОСТ 19433-81 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» относятся к 1 наивысшему классу опасности.

Следует отличать ВВ, ВМ и пороха от взрывоопасных (пожаровзрывоопасных) веществ и материалов [3, 4].

Взрывоопасные (пожаровзрывоопасные) вещества и материалы могут гореть и взрываться при взаимодействии с окислителем (кислородом воздуха). Исключение могут составить такие вещества, как ацетилен, гидразин, этилен и др., которые в определенных условиях могут взрываться и гореть с большим тепловым эффектом в отсутствие окислителя за счет высокой энергетики эндотермических реакций. Иначе говоря, для химического превращения пожаровзрывоопасных веществ условием такого превращения, как правило, является наличие окислителя (например, кислорода воздуха).

Для возбуждения взрывов ВВ и ВМ нужен лишь источник воспламенения, а окислитель в достаточном количестве входит в структуру ВВ и ВМ в виде определенных функциональных групп, ответственных за внезапное развитие процесса с выделением большого количества энергии и способных инициировать взрывчатые химические превращения в отсутствие кислорода воздуха. Эти структуры могут включать следующие группы: $-NO_2$, $-NO_3$ (в органических и неорганических веществах); --N=N=N– (в органических и неорганических азидах); $-NX_2$ (X – галоид); -N=C= (в фульминатах) и др.

Все ВВ и пороха при хранении в адиабатических условиях способны разлагаться (в зависимости от условий хранения) с возрастающей скоростью до взрыва. При хранении в неадиабатических условиях их нестабильность (разложение) определяются размерами, формой, материалом стенок изделия, упаковки, температурой оборудования и др.

Теоретические аспекты горения, в частности, порохов, представлены в работах академика Я.Б. Зельдовича [5]. Температура горения порохов $T_г$ достаточно высока (1200–2000 ºС), продукты горения представляют собой смесь газов. В зоне горения осуществляется весь интервал температур от начальной T_0 до $T_г$. Одновременно с изменением температуры от T_0 до $T_г$ происходит и изменение агрегатного состояния. Существенное влияние давления на скорость горения порохов несомненно указывает на роль газовой фазы. Отличие горения порохов от термического разложения обычных горючих веществ заключается в скорости процесса: при скорости горения 1 мм/с ширина зоны прогрева меньше 0,2 мм, время прогрева 0,2 с (эти величины мало зависят от температуры поверхности вещества). При таком быстром нагреве, энергичном подводе тепла рост температуры пороха ограничивается только эндотермическими реакциями, которые сопровождаются переходом его в газовую фазу. Скорость этих реакций при низкой температуре ниже скорости обычного разложения $T_р$, однако с ростом температуры скорость эндотермических реакций растет быстрее и при определенной температуре $T_р$ достигнет величины, равной скорости горения. Эта температура и будет достигнута на поверхности раздела пороха и газа.

Химическая энергия конечных продуктов горения пороха меньше химической энергии собственно пороха. Именно в высвобождении химической энергии, превращении ее в тепловую и состоит сущность горения порохов. Продукты раз-

ложения реагируют дальше в газовой фазе с выделением основных количеств тепла.

Горение порохов и ВВ в условиях замкнутого или полузамкнутого объема способствует повышению давления, приводящего к существенному ускорению горения, к развитию взрыва и детонации [1–5]. Все ВВ и пороха при хранении в адиабатических условиях способны разлагаться с возрастающей скоростью до взрыва. Если условия неадиабатические, то, как уже отмечалось, критические условия их разложения определяются формой, температурой и материалом стенок изделия, контейнера, в котором они находятся.

Цель работы заключается в описании основных элементов системы автоматической противопожарной защиты, отличающейся большим быстродействием и высокой эффективностью для подавления пожаров и взрывов в технологических процессах производства, хранения, эксплуатации оборудования при обращении в них веществ и материалов с высоким энергетическим потенциалом.

Противопожарная защита объектов защиты, в которых обращаются вещества и материалы, разлагающиеся с высокими значениями экзотермического эффекта и давления взрыва

Технологические процессы производства и хранения ВВ, ВМ пиротехнической продукции и многих других химически активных веществ и материалов отличаются большой концентрацией горючих со значительным энергетическим потенциалом, превращение которых осуществляется весьма интенсивно. Такие технологические процессы характеризуются высокой степенью роботизации и автоматизации. Аварийные ситуации на объектах защиты связаны со стремительно протекающими процессами возникновения очага пожара (взрыва). Поэтому временные характеристики предотвращения пожара (взрыва) должны быть еще более быстротечными. В соответствии с третьим принципом обеспечения взрывобезопасности [6], если не удается избежать образования горючих систем и возможности возникновения импульсов, инициирующих горение (взрыв), должно быть предусмотрено такое выполнение технологического процесса, при котором достигается локализация очага горения в пределах определенного оборудования или его подавление в составе технологического блока или технологической операции.

Большой вклад в дело обеспечения противопожарной защиты объектов, на которых обращаются вещества и материалы с высоким энергетическим потенциалом, сделан А.И. Веселовым с сотрудниками [7]. Ими была заложена научно-практическая база по разработке быстродействующих автоматических пожаротушащих систем (БАПС) в системе автоматической противопожарной защиты (АПЗ) объектов производства, хранения, применения, в которых обращаются такие вещества и материалы.

Принципиальная структурная схема автоматического пожаротушения пожаровзрывоопасных участков (операций, элементов) технологического процесса (рис. 1) производства и хранения веществ и материалов (продуктов) с высоким энергетическим потенциалом должна включать системы реагирования на пожар, взрыв (пожар, взрыв являются внешним импульсом возмущения), управления (датчики обнаружения загорания, запорно-пусковые устройства), регулирования (устройство подачи огнетушащего вещества, блокирования пожара, взрыва) [7].

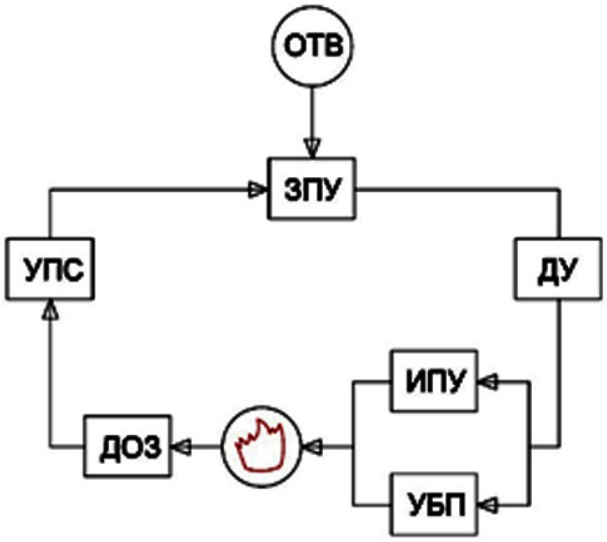

Рис. 1. Структурная схема быстродействующей системы автоматического пожаротушения: ДОЗ – датчик обнаружения загорания (взрыва); УПС – усилитель-преобразователь сигнала; ЗПУ – запорно-пусковое устройство; ДУ – дозирующее устройство; ИПУ – исполнительное устройство (ороситель, водогенератор, форсунка); УБП – устройство блокирования пожара, взрыва (пламяотсекатель, огнепреградитель, водяная завеса); ОТВ – дозатор огнетушащего вещества

При разработке систем АПЗ для тушения указанных выше продуктов наиболее важными параметрами для ее характеристики были определены:

динамика процесса горения и ее энергетические показатели;

предельно допустимое время свободного горения;

зависимость между интенсивностью подачи огнетушащего вещества и временем тушения.

Экспериментальные исследования [7] позволили выбрать способы тушения, огнетушащее вещество, динамические характеристики систем автоматического пожаротушения и, в частности, на основе данных о спектрах излучения пламен – фотоэлектрические преобразователи (датчики), а также определить предельно допустимое время свободного горения. Следует отметить, что предельно допустимое время свободного горения включает периоды регулируемого горения и нерегулируемого горения. Периодами регулируемого горения являются: время быстродействия системы; время обнаружения горения датчиком; время действия запорно-пускового устройства; время транспортировки огнетушащего вещества; время перемещения огнетушащего вещества; общее время действия системы; время тушения пожара (подавления взрыва); время локализации пожара (взрыва). Нерегулируемое горение включает: взрывчатое превращение, выброс горючего вещества, уход пламени в скрытые полости, потерю несущей и прочностной способности частями изделий, оборудования, строительных конструкций и т. д. Если на стадии разработки АПЗ не будут определены все стадии горения и, прежде всего, стадии нерегулируемого горения, то в этом случае трудно рассчитывать на успешную работу АПЗ при аварии.

На рис. 2 представлены временные параметры, характеризующие динамику развития горения и подавления горения (взрыва) систем автоматического пожаротушения.

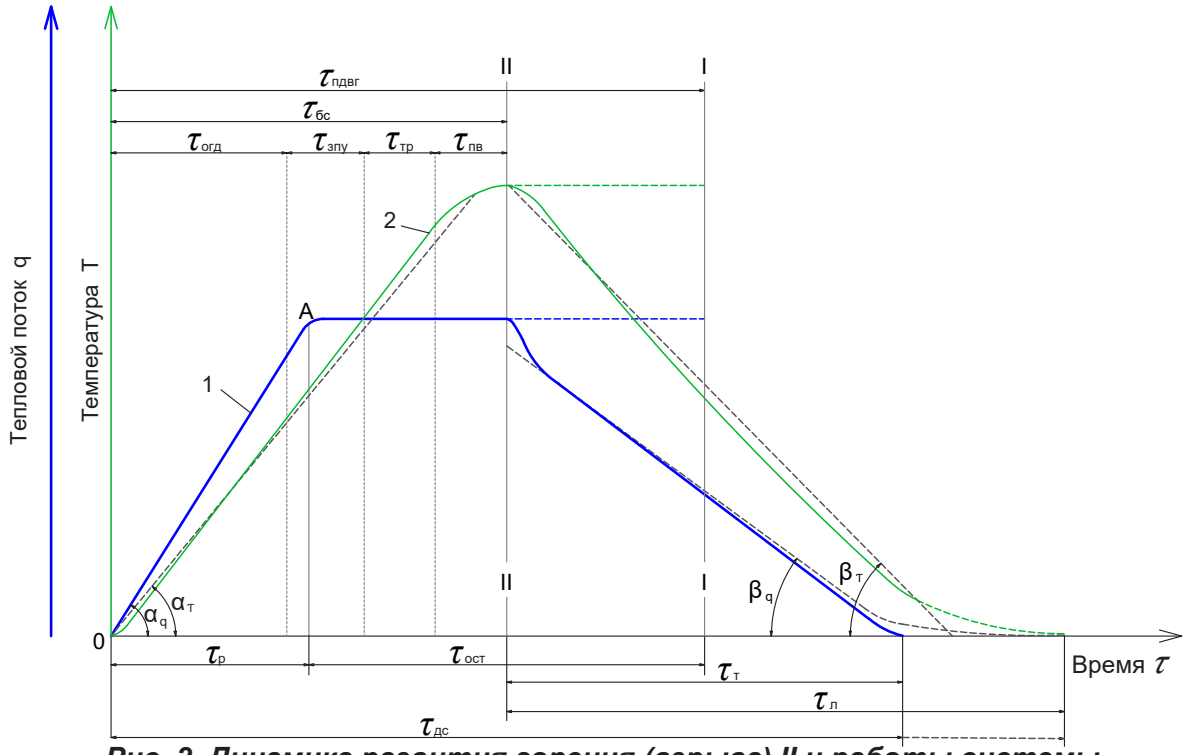

Рис. 2. Динамика развития горения (взрыва) II и работы системы автоматической быстродействующей установки пожаротушения I в процессе изменения температуры и теплового потока: 1 – кривая изменения теплового потока; 2 – кривая изменения температуры; $\tau_{пдвг}$ – предельно допустимое время свободного горения; $\tau_{бс}$ – время быстродействия системы; $\tau_{огд}$ – время обнаружения горения датчиком; $\tau_{зпу}$ – время действия запорно-пускового устройства; $\tau_{тр}$ – время транспортирования огнетушащего вещества; $\tau_{пв}$ – время перемещения огнетушащего вещества; $\tau_{р}$ – период распространения горения по площади; $\tau_{ост}$ – период относительно стабильного горения; $\tau_{дс}$ – время действия системы; $\tau_{т}$ – время тушения очага пожара; $\tau_{л}$ – время локализации пожара. Точка А – достижение максимального значения теплового потока. Угловые значения α и β – углы наклона кривых, характеризующие динамику роста на начальной стадии пожара и падения при тушении и локализации пожара значений температуры и теплового потока, соответственно

Как следует из рис. 2, предельно допустимое время свободного горения $\tau_{пдвг}$ включает время быстродействия системы $\tau_{бс}$. В свою очередь время быстродействия системы $\tau_{бс}$ включает время обнаружения горения $\tau_{огд}$, время действия запорно-пускового устройства $\tau_{зпу}$, время транспортирования $\tau_{тр}$ и время перемещения $\tau_{пв}$ огнетушащего вещества.

С другой стороны, время быстродействия системы $\tau_{бс}$ состоит из времени распространения горения по площади $\tau_{р}$ и включает часть периода относительно стабильного горения $\tau_{ост}$. В целом время действие системы $\tau_{дс}$ включает время распространения горения по площади $\tau_{р}$, период относительно стабильного горения $\tau_{ост}$, время тушения $\tau_{т}$, а также время локализации пожара $\tau_{л}$.

Предельно допустимое время свободного горения $\tau_{пдвг}$ позволяет определить быстродействие автоматических систем $\tau_{бс}$, исходя из зависимости:

$\tau_{бс} = \tau_{пдвг} / K_{б}$, где $K_{б}$ – коэффициент безопасности, равный 1–3.

В процессе экспериментальных исследований [7] при тушении различных веществ и материалов с высоким энергетическим потенциалом, когда амплитудное значение выделяющейся тепловой энергии еще не достигает максимального

значения, установлены оптимальные расходные характеристики быстродействующих систем пожаротушения, конструкции распыляющих насадков, пламяотсекающих систем, а также способы подачи огнетушащего состава, в качестве которого выбрана распыленная вода. На основании этих исследований определены оптимальные соотношения между площадями очага горения и орошения водой, предельно допустимая регистрируемая датчиками площадь горения и другие факторы, характеризующие эффективность автоматического пожаротушения.

При реализации результатов экспериментальных исследований на этапе опытно-конструкторских работ разработана программа (алгоритм) тушения с помощью БАПС в различных технологических процессах, которая включает:

автоматическое обнаружение загораний за 0,5–6 с от момента появления пламени для быстродействующих и 0,005–0,1 с для сверхбыстродействующих систем;

выпуск и подачу огнетушащего вещества к очагу горения за 0,5–2 с для быстродействующих и 0,04–0,08 с для сверхбыстродействующих систем;

локализацию, тушение и блокирование пожара;

автоматическую остановку технологического оборудования (узла, блока), находящегося в зоне пожара;

автоматическое включение устройств отвода газов от очага пожара, перекрытие проемов стен с соседними помещениями, сброс горящего продукта в емкости и др.;

передачу аварийных сигналов о пожаре в пожарную часть и на пульт дежурного на объекте защиты.

Реализация программы системы АПЗ может быть построена по структурной схеме, представленной на рис. 1.

На основе выполненных исследований создана БАПС для подавления быстро развивающихся пожаров и взрывов внутри технологического оборудования для изготовления веществ и материалов с высокой энергетикой. Эта система обеспечивает подачу огнетушащего вещества с момента возникновения горения (взрыва) за 60–80 мс. Система испытана на объемах оборудования 2 м^3 и 15 м^3 в полигонных условиях и была установлена в качестве элемента противопожарной защиты на одном из действующих предприятий.

Таким образом, разработаны системы автоматической противопожарной защиты, отличающиеся большим быстродействием и высокой эффективностью для подавления пожаров и взрывов в технологических процессах производства, хранения, эксплуатации оборудования при обращении в них высокоэнергетических веществ и материалов. С учетом современного состояния техники при использовании искусственного интеллекта и при растущей цифровизации, роботизации объектов защиты, изложенные в статье подходы к повышению эффективности и быстродействия систем противопожарной защиты могут быть существенно усовершенствованы и применены для обеспечения пожаровзрывобезопасности технологических процессов, в которых обращаются вещества и материалы с высокими энергетическими показателями и отличающиеся большим экзотермическим эффектом при разложении.

Заключение

Представлены системы автоматической противопожарной защиты, отличающиеся большим быстродействием и высокой эффективностью для подавления пожаров и взрывов в технологических процессах производства, хранения, эксплуатации оборудования при обращении в них веществ и материалов с высоким энергетическим потенциалом. Установлены оптимальные расходные характеристики быстродействующих систем пожаротушения, конструкции распыляющих

насадков, пламеотсекающих систем и способов подачи огнетушащего состава, в качестве которого выбрана распыленная вода. На основании этих исследований определены оптимальные соотношения между площадями очага горения и орошения водой, предельно допустимая, регистрируемая датчиками, площадь горения и другие факторы, характеризующие эффективность автоматического пожаротушения.

Таким образом, с учетом современного состояния техники, растущей цифровизации и роботизации объектов защиты, применения ИИ, изложенные в статье подходы к разработке быстродействующих систем противопожарной защиты, могут послужить основой для создания новых систем обеспечения пожаровзрывобезопасности при авариях на объектах защиты, в которых обращаются вещества и материалы, разлагающиеся с высокой энергетикой и большим экзотермическим эффектом.

Список литературы

1. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств. Москва: Мир, 1989. 672 с.

2. Взрывные явления. Оценка и последствия / *У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн, Дж. Кулеш, Р. Стрелоу.* Москва: Мир, 1986. 319 с.

3. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. Москва: ВНИИПО МЧС России, 1998. 597 с.

4. *Кармолин А.Л., Чернюгов А.Д., Коршунов Ю.Н.* Безопасная перевозка взрывчатых веществ железнодорожным транспортом. Москва: Транспорт, 1992. 383 с.

5. *Зельдович Я.Б.* Химическая физика и гидродинамика. Избранные труды. Москва: «Наука», 1984. 374 с.

6. *Розловский А.И.* Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. Москва: Химия, 1972. 365 с.

7. *Веселов А.И.* Исследование по созданию быстродействующих установок автоматического пожаротушения // Пожарная наука и техника: сб. трудов. Москва: ВНИИПО, 1977. С. 53–63.

Статья поступила в редакцию 17.09.2026;

одобрена после рецензирования 16.10.2026;

принята к публикации 09.11.2026.

Вогман Леонид Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник; ***Зуйков Владимир Александрович*** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; ***Простов Евгений Николаевич*** – старший научный сотрудник; ***Аверкина Наталья Бориовна*** – старший научный сотрудник.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Leonid P. Vogman – Doctor of Technical Sciences, Main Researcher; ***Vladimir A. Zuikov*** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher; ***Evgeny N. Prostov*** – Senior Researcher; ***Natalya B. Averkina*** – Senior Researcher.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.