

УДК 620.263

doi: 10.53816/20753608\_2025\_4\_90

## ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА УНИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО И МОБИЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ И ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

## SUBSTANTIATION OF THE APPEARANCE OF A UNIFIED SYSTEM FOR REMOTE AND MOBILE MONITORING OF STORAGE FACILITIES FOR TOXIC AND EXPLOSIVE SUBSTANCES

*Академик РАН В.Ю. Мелешко<sup>1</sup>, чл.-корр. РАН Г.Я. Павловец<sup>1</sup>, А.А. Михайлов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Военная академия РВСН им. Петра Великого, <sup>2</sup>Научно-производственная фирма «ИНКРАМ»

*V.Y. Meleshko, G.Ya. Pavlovets, A.A. Mikhaylov*

Приведены результаты исследования возможности создания и обоснование облика унифицированной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения взрывопожароопасных и токсичных веществ путем использования перспективных акустического и импульсно-термокаталитического методов и детекторов на их основе, способных обнаруживать предельно допустимые и взрывоопасные концентрации паров. Показано, что разработанные детекторы позволяют решать задачи контроля предельно допустимых и довзрывоопасных концентраций компонентов жидких ракетных топлив и углеводородных горючих.

**Ключевые слова:** мониторинг, загазованность, методы детектирования, предельно допустимые и взрывоопасные концентрации.

The results of the study of the possibility of creating and substantiating the appearance of a unified system for remote and mobile monitoring of explosive and toxic substances storage facilities through the use of promising acoustic and pulse-thermocatalytic methods and detectors based on them capable of detecting maximum permissible and explosive vapor concentrations are presented. It is shown that the developed detectors make it possible to solve the problems of monitoring the maximum permissible and pre-explosive concentrations of components of liquid rocket fuels and hydrocarbon fuels.

**Keywords:** monitoring, gas contamination, detection methods, maximum permissible and explosive concentrations.

Анализ отечественного и зарубежного опыта разработки и применения методов детектирования паров компонентов жидких ракетных топлив и горюче-смазочных материалов (КЖРТ и ГСМ) показывает, что в настоящее время на объектах их хранения в Министерстве обороны Российской Федерации используются приборы детектирования и индикации паров в лучшем случае периодического действия, которые не позволяют получать информацию о возникновении нештатных

ситуаций, связанных с превышениями предельно допустимых концентраций гептила и амила, довзрывоопасных концентраций паров КЖРТ и ГСМ [1–3]. Каждый из компонентов КЖРТ характеризуется предельно допустимой концентрацией в воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>р.з.</sub>), а горючие, кроме того, и нижним концентрационным пределом по воспламенению (НКПР) [4, 5].

Для контроля ПДК<sub>р.з.</sub> паров КЖРТ и горючих на практике используют фотоколориметрический,

электрохимический, фотоионизационный, пламенно-ионизационный и полупроводниковый методы [6, 7], таблица.

Для контроля дозврывных концентраций (ДВК) КЖРТ и горючих практически применяются термокаталитический, инфракрасный и акустический методы (таблица).

Основные методы контроля ПДК КЖРТ реализованы в средствах детектирования. Например, фотоколориметрические переносные и стационарные газоанализаторы выполнены на бумажной фотоколориметрической ленте и оформлены в виде сменных ленточных кассет. Все метрологические параметры определяются при изготовлении ленты и, как считается, сохраняются в течение срока хранения. Однако указанные газоанализаторы могут быть настроены только на один газ (в соответствии с установленной лентой), поэтому для контроля КЖРТ необходим для каждого анализируемого компонента индивидуальный прибор [8, 9].

Преимуществом фотоколориметрических приборов является высокая чувствительность, практически недостижимая для других методов измерений, а к недостаткам относятся ограниченный диапазон рабочих температур, сильное влияние влажности на показания, относительно низкая селективность и ряд других [10].

К сожалению разработанные и поставленные на объекты хранения КЖРТ и заправочные

комплексы системы измерения концентраций ПДК паров КЖРТ кратно выработали свой ресурс, а на ряде объектов в эксплуатацию так и не введены. Выбор фотоколориметрических приборов для контроля загазованности в местах хранения КЖРТ являлся вынужденным компромиссом при отсутствии других методов измерений.

Применение электрохимических методов детектирования паров гептила, гидразина и диоксида азота на объектах хранения и эксплуатации КЖРТ МО РФ крайне ограничено вследствие небольшого времени службы и сложности проверки их работоспособности и градуировки на месте эксплуатации.

Особенностью применения фотоионизационных детекторов при контроле ПДК паров топлив является сильное различие чувствительности детектора к различным углеводородам. Так, чувствительность детектора к гексану в 9 раз ниже, чем к бензолу и другим ароматическим углеводородам. Соотношение концентраций различных фракций и паров в воздухе, в том числе алканов и ароматических соединений, зависит от производителя вещества (концентрация в жидкости) и, в значительной степени, от температуры. Вследствие этого создать фотоионизационный детектор ПДК углеводородов паров топлив практически невозможно. Фотоионизационный детектор можно применять только как индикаторное средство контроля загазованности.

Таблица

Применимость методов детектирования

Метод детектирования	Детектируемые концентрации		Возможность применения в МО РФ/новизна	Контролируемые вещества
	ПДК <sub>р.з</sub>	ДВК		
Фотоколориметрический	+	–	Применимо/устаревший	Гептил, диоксид азота
Электрохимический	+	–	Не применимо	
Полупроводниковый (на диоксиде олова)	–	–	Не применимо	
Полупроводниковый (МДП-сенсоры)	+	–	Применимо/новый метод	Гептил, диоксид азота
Фотоионизационный	+	–	Применимо	Децилин, синтин, самин
Пламенно-ионизационный	+		Не применимо	
Термокаталитический	–	+	Применимо/действующий	Пары ГСМ и КЖРТ
Оптический	–	+	Не применимо	
Акустический	–	+	Применимо/новый метод	Пары ГСМ и КЖРТ

Подавляющее количество детекторов до- взрывных концентраций горючих основано на термокаталитическом и инфракрасном методах измерения. В инфракрасных детекторах используются преимущественно зарубежные оптические и электронные компоненты, поэтому их применение в МО РФ практически запрещено.

Таким образом, для детектирования ПДК и ДВК паров КЖРТ и горючих методы, приведенные в таблице, были использованы для разработки детекторов при обеспечении непрерывного мониторинга на объектах МО РФ в составе унифицированной системы мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ.

Учитывая наличие угроз террористического характера, вызванных в том числе все возрастающей активностью беспилотных средств, одной из актуальных проблем является обеспечение безопасности функционирования потенциально опасных объектов хранения высокотоксичных, агрессивных и взрывопожароопасных веществ, которая достигается, прежде всего, за счет повышения эффективности защиты технологического оборудования и оперативного обнаружения очагов образования взрыво- и пожароопасных концентраций парогазовоздушных смесей (ПГВС) компонентов КЖРТ и горючих [11].

Для предупреждения развития событий по данной схеме при нештатных ситуациях на объектах хранения необходимо создание комплекса средств детектирования и оповещения (КСДО) оперативного обнаружения очага утечки КЖРТ и ГСМ, и изменения их концентраций ниже нижнего предела по воспламенению и детонации на основе высокочувствительных датчиков газового контроля.

Любой химически опасный объект (ХОО) представляет собой сложную техническую систему, включающую в себя оборудование для хранения топлива, перекачки, измерения и контроля параметров, лабораторию контроля качества.

Определяющая идея формирования облика унифицированной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ в местах хранения и эксплуатации КЖРТ и ГСМ состоит в переходе от периодического контроля ПДК к непрерывному детектированию

газо-воздушной среды комплексом стационарного и мобильного базирования, предназначенного для контроля ПДК и нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), обеспечивающему повышение достоверности и оперативности принятия решения об аварийных (нештатных) ситуациях, своевременное оповещение персонала и автоматическую локализацию аварийной ситуации [12].

Проведенными исследованиями было показано, что перспективные акустический и импульсно-термокаталитический методы и детекторы (акусторезонансный и с МДП-сенсором) позволяют обнаруживать до взрывные, предельно допустимые и взрывоопасные концентрации паров КЖРТ и горючих в условиях непрерывного мониторинга объектов хранения высокотоксичных и агрессивных веществ [6, 7].

Основой акусторезонансного детектора (рис. 1) является цилиндрический резонатор 1. На боковых стенках резонатора установлены излучатель 3 (телефон) и приемник звука 2 (микрофон), сигнал с которого поступает на усилитель 6 и обрабатывается микропроцессором 8. В резонаторе с помощью генератора частоты 5 формируется звуковая волна, частоту которой можно регулировать. Полость резонатора сообщается с окружающей атмосферой отверстиями 4. В одно из отверстий вставлен сенсор влажности и температуры 7.

Расчет концентрации детектируемой примеси сводится к измерению скорости звука и температуры воздуха. Компенсация влажности обеспечивается одновременным измерением относительной влажности и температуры газа в резонаторе с последующим расчетом концентрации (парциального давления) паров воды.

Центральным элементом детектора служит микроконтроллер (МК). Он предназначен для снятия акусторезонансных характеристик резонатора, наполненного смесью воздуха и определяемого газа. Цифровым каналом связи МК соединен с блоком управления динамиком (БУД). На цифровые входы БУД передаются коды частоты и уровня звукового сигнала, который вырабатывает динамик, подключенный к выходу БУД и установленный в резонаторе. Для контроля уровня звука при определении резонансной частоты в резонаторе служит микрофон, подключенный через микрофонный усилитель

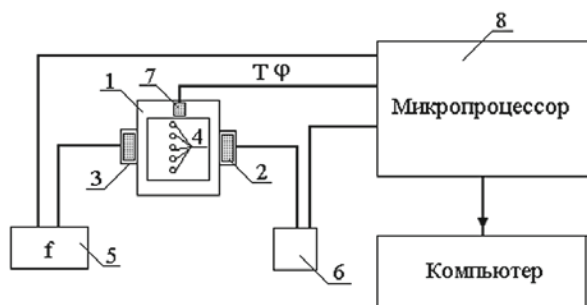


Рис. 1. Принципиальная схема акусторезонансного детектора: 1 — резонатор; 2 — микрофон; 3 — телефон; 4 — отверстия в резонаторе; 5 — цифровой генератор частоты; 6 — усилитель; 7 — сенсор влажности и температуры; 8 — микропроцессор

с детектированием амплитуды сигнала к аналоговому входу МК. В резонаторе или рядом с ним в камере детектора акусторезонансного преобразователя (АРП) установлены датчики температуры и влажности, связанные с МК своими входами-выходами. По показаниям этих датчиков МК производит коррекцию резонансной частоты по температуре и влажности.

Конструкция акусторезонансного детектора обеспечивает выполнение нескольких взаимоисключающих требований: достаточно быструю реакцию и высокую защиту от влаги и пыли. Быстрая реакция на изменение состава воздуха обеспечивается за счет высокого газообмена в резонаторе через отверстия. Материал резонатора должен иметь высокую плотность для обеспечения большого коэффициента отражения звуковой волны от стенки резонатора. Кроме того, материал резонатора должен быть устойчив к пониженным температурам, коррозионноустойчивым, иметь небольшой коэффициент линейного расширения.

Термокаталитический детектор дозрывных концентраций (рис. 2) является самым распространенным для горючих газов. В основе работы термокаталитического детектора лежит метод измерения тепловой энергии, выделяющейся при сгорании анализируемых газов. Современные детекторы состоят из двух элементов (пеллисторов): рабочего и сравнительного. Оба элемента представляют собой нагретые электрическим током до температуры 450–550 °С платиновые проволоочки с нанесённым на них оксидом алюминия.

На рабочем элементе оксид алюминия покрыт катализатором, на сравнительном — нет. Оба элемента, как правило, включаются в мостовую схему измерения. При отсутствии в воздухе анализируемых веществ температура проволоочек в обоих элементах почти одинакова (эти элементы специально подбираются при изготовлении сенсоров), мост сбалансирован. При появлении в воздухе горючего газа происходит реакция окисления на поверхности рабочего элемента, выделяется тепло, которое приводит к увеличению температуры проволоочки и, соответственно, ее сопротивлению. Происходит разбалансировка моста, напряжение на выходе моста прямо пропорционально концентрации сгораемого вещества. Чувствительность детектора пропорциональна тепловому эффекту, выделившемуся при сгорании вещества.

Основой детектора ПДК является сенсорный блок, в котором установлены полупроводниковый МДП сенсор емкостного типа и сенсор температуры и влажности. На сенсорный блок установлен резистивный нагреватель. Подача анализируемого воздуха через сенсорный блок производится микрокомпрессором через трехпроходной переключающий электрический клапан и фильтр. Управление детектором обеспечивает электронный модуль (рис. 3).

В режиме измерения работы детектора клапан переключается в режим подачи пробы Б и анализируемый воздух поступает напрямую в сенсорный блок. Выходные сигналы сенсоров (емкость МДП сенсора, температура и влажность) обрабатываются непрерывно в электронном модуле, который производит расчет текущей концентрации анализируемого вещества и пере-

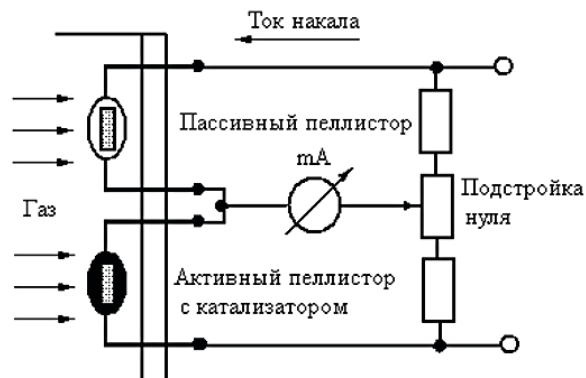


Рис. 2. Принципиальная схема работы термокаталитического сенсора



Рис. 3. Функциональная схема детектора ПДК

дачу ее значения на панель индикации и в выходные цепи. Через установленный период времени нормальной работы (устанавливается программно, как правило через 4 часа работы в основном режиме) детектор переходит в режим принудительной установки ноля. Микрокомпрессор осуществляет непрерывный отбор пробы из анализируемой среды и прокачивает анализируемую пробу через газовый канал детектора.

Лабораторные исследования экспериментальных образцов детекторов подтвердили их работоспособность, достаточно высокую чувствительность и стабильность, приемлемое быстродействие и возможность практического использования в непрерывном круглосуточном режиме. При этом обнаружение паров горючих в воздушной среде обеспечивается в диапазоне концентраций от 0,05 до 1 мг/м<sup>3</sup> (от 0,5 до 10 ПДК р.з.), агрессивных веществ — в диапазоне концентраций от 1 до 20 мг/м<sup>3</sup> (0,5...10 ПДКр.з.). Обнаружение ДВК паров горючих в воздушной среде обеспечивается в диапазоне концентраций от 0 до 50 % НКПР.

Показано, что влияние температуры и влажности на показания всех разработанных экспериментальных образцов детекторов незначительно или скомпенсировано [6].

По результатам натурных испытаний в составе прототипов систем мониторинга разработаны рекомендации к применению экспериментальных образцов детекторов.

Для сохранения стабильных рабочих характеристик и возможности долгосрочного использования разработанных экспериментальных

образцов детекторов в условиях стабильного среднего или периодического высокого уровня концентрационной нагрузки, в том числе длительных перегрузок, при формировании унифицированной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ использованы детекторы на основе МДП-сенсоров и АРП.

В целом система дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ (рис. 4) включает в себя:

- комплекс датчиков;
- блок управления;
- каналобразующую аппаратуру для связи с датчиками и системой верхнего уровня;
- исполнительные устройства (реле) для включения аварийного оповещения и средств локализации;
- метеокомплекс (для объектов, располагающихся на открытых площадках, в том числе мобильных);
- программное обеспечение;
- комплект эксплуатационной документации.

Система обеспечивает непрерывное автоматическое детектирование [4]:

- паров горючих в диапазоне концентраций от 0 до 50 % нижнего концентрационного предела распространения пламени;
- паров токсичных и агрессивных веществ в диапазоне от 1 до 5 предельно допустимой концентрации в рабочей зоне.

В рамках предлагаемой концепции приемлемыми следует признать разработанные



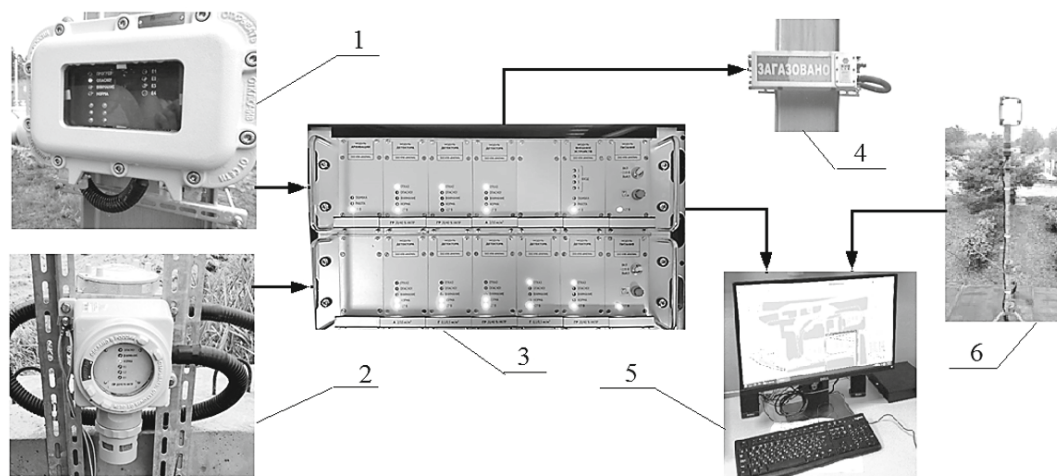


Рис. 4. Блок-схема унифицированной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ: 1 — детекторы ПДК; 2 — детекторы ДВК; 3 — блок контроля и управления; 4 — сигнализация; 5 — автоматизированное рабочее место 6 — метеостанция

конструкции прототипов систем мониторинга для измерения:

- предельно-допустимых концентраций рабочей зоны КЖРТ и горючих;
- ПДКр.з. горючих совместно с измерением дозврывоопасных концентраций (ДВК) их паров.

В состав разработанных систем мониторинга вошли следующие экспериментальные образцы детекторов прототипов:

- акусторезонансный детектор АРП для измерения ДВК паров горючих [6];
- детектор с МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)-сенсором для измерения ПДКр.з. горючих [13];
- детектор с МДП-сенсором для измерения ПДКр.з. паров агрессивных веществ;
- детектор с электрохимическим сенсором для измерения ПДКр.з. паров агрессивных веществ;
- детектор с фотоионизационным сенсором для измерения ПДКр.з. паров горючих;
- детектор с термокаталитическим сенсором для измерения ДВК паров горючих.

По результатам натурных испытаний в составе прототипов систем мониторинга разработаны рекомендации к применению экспериментальных образцов детекторов согласно следующим критериям:

- оптимальные места расположения для эффективной работы;

- общий уровень нагрузки по концентрации целевых веществ;
- вероятность перегрузок по концентрации целевых веществ;
- селективность и возможность использования для детектирования нескольких наименований целевых веществ;
- возможность обслуживания с требуемой периодичностью;
- возможность использования имитаторов целевых веществ при обслуживании.

Таким образом, анализ состояния проблемы обеспечения безопасности функционирования потенциально опасных объектов хранения высокотоксичных и агрессивных веществ свидетельствует о том, что для повышения эффективности защиты технологического оборудования и оперативного обнаружения очагов образования взрыво- и пожароопасных концентраций парогазовоздушных смесей компонентов жидких ракетных топлив необходимо [3, 14]:

- создание системы непрерывного мониторинга, оперативного обнаружения очага утечки КЖРТ, горючих и изменения их концентраций ниже нижнего предела по воспламенению и детонации на основе высокочувствительных датчиков газового контроля;
- создание комплекса средств детектирования и мониторинга объекта, содержащего высокотоксичные и взрывопожароопасные КЖРТ и горючие, с формированием сигналов оповещения

на основе высокочувствительных детекторов нового поколения и современной отечественной элементной базы;

– использование при формировании комплекса средств детектирования и мониторинга комплектующих элементов отечественного производства.

При реализации предлагаемых подходов к решению проблемных вопросов непрерывного мониторинга объектов хранения высокотоксичных и агрессивных веществ будет обеспечено решение практических задач по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах с возможным образованием парогазовоздушных смесей, способных к взрывчатому превращению и токсическому воздействию на окружающую среду. Эти концептуальные положения являются основой при научно-техническом обосновании направлений создания перспективной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ.

#### Список источников

1. Шапошников А.А. Биологический и химический терроризм: история и современность // РЭТ-инфо. 2007. № 4 (64). С. 35–40.
2. Севрюков И.Т., Степичев М.М. Методология исследования взрывобезопасности военно-технических систем в концепции обеспечения национальной безопасности // Вооружение. Политика. Конверсия. 2007. № 4. С. 85–92.
3. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Зикеев А.В. и др. Организация контроля загазованности токсичными и агрессивными веществами в местах их хранения; сб. трудов Межд. научн. симпозиума «Специальная связь и безопасность информации: технология, производство, управление». Краснодар – Терскол, 2021. С. 106–110.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДКр.з.) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
5. Таубкин И.С. Классификация веществ по их способности к взрывчатому превращению // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. № 11. С. 33–53.
6. Михайлов А.А., Этрекова М.О., Стороженко А.С. и др. Контроль дозврывоопасных концентраций газов и паров с помощью акустического детектора // Химическая безопасность. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–150.
7. Болодурин Б.А., Литвинов А.В., Михайлов А.А., Ноздря Д.А. и др. Комплексное исследование чувствительности МДП-сенсоров со структурами  $\text{Pd-SiO}_2\text{-Si}$ , к содержанию различных газов в воздухе  $\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Si}$  // Российский химический журнал. 2016. № 3. Т. LX. С. 96–104.
8. Газоанализатор СФГ-М. Описание типа средств измерений. Регистрационный № 27048-08.
9. Преобразователи измерительные акустореzonансные АРП 1.0. Описание типа средств измерений. Регистрационный № 54684-20.
10. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Михайлов А.А., Зикеев А.М. Влияние различных факторов на работоспособность детекторов; сб. материалов IX Всероссийской научно-техн. конф. «Фундаментальные основы баллистического проектирования». СПб.: БГТУ «Военмех». 2024. С. 68–70.
11. Севрюков И.Т., Свиридок Е.В. Разработка методологических подходов к оценке химической безопасности потенциально опасных объектов // Технологии гражданской безопасности. № 1. 2012. С. 94–97.
12. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Михайлов А.А. Концепция создания перспективной системы дистанционного и мобильного мониторинга объектов хранения токсичных и взрывопожароопасных веществ / Актуальные проблемы защиты и безопасности // Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2024. Т. 1. С. 234–238.
13. Николаев И.Н., Емелин Е.В., Соколов А.В. Чувствительность МДП-сенсоров к содержанию различных газов в воздухе // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 37–39.
14. Павловец Г.Я., Мелешко В.Ю., Эпинатьев И.Д., Зикеев А.М., Михайлов А.А. К вопросу о мониторинге объектов хранения взрывопожароопасных и агрессивных веществ; сб. материалов VII Всероссийской научно-техн. конф. Фундаментальные основы баллистического проектирования. СПб.: БГТУ «Военмех». 2021. С. 170–173.