

УДК: 623.459.64

DOI: 10.53816/23061456_2021_9–10_96

**НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ
ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**NEW TECHNICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF DEVELOPMENT
OF PERSONAL RESPIRATORY PROTECTION EQUIPMENT
FOR MILITARY PURPOSES**

Д-р техн. наук С.В. Саркисов, А.А. Игнатьев, д-р физ.-мат. наук С.З. Черемисин, В.А. Валуйский

D.Sc. S.V. Sarkisov, A.A. Ignatiev, D.Sc. S.Z. Cheremisin, V.A. Valuytskiy

Военный институт (инженерно-технический) ВА МТО им. А.В. Хрулева

В работе приведены новые технические решения, позволяющие повысить эффективность средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) за счет размещения микрочипов с газочувствительными сенсорами в фильтрующе-поглощающих коробках (ФПК) противогазов различных типов, с целью определения текущего состояния фильтрующего материала и индикации окончания срока службы, а так же для обнаружения отравляющих веществ (ОВ), аварийно химически опасных веществ (АХОВ) и определения их концентраций.

Показана возможность интеграции экспериментального образца газоаналитического устройства с ФПК противогаса типа ПМК-С. Приведены основные характеристики созданной экспериментальной системы на основе полупроводниковых сенсоров.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты органов дыхания, фильтрующе-поглощающая коробка, полупроводниковые наноструктурные сенсоры, индикация отравляющих и аварийно химически опасных веществ.

The paper presents new technical solutions that make it possible to increase the effectiveness of personal respiratory protection equipment (PPE) by placing microchips with gas-sensitive sensors in filter-absorbing boxes (FPC) of gas masks of various types in order to determine the current state of the filter material and indicate the end of service life, as well as to detect toxic substances (s), emergency chemically hazardous substances (AHS) and determine their concentrations.

The possibility of integrating an experimental sample of a gas-analytical device with the FPC of a gas mask of the PMK-S type is shown. The main characteristics of the created experimental system based on semiconductor sensors are presented.

Keywords: personal protective equipment for respiratory organs, filter-absorbing box, semiconductor nanostructured sensors, indication of toxic and emergency chemically hazardous substances.

Введение

Последние события, происходящие в мире, подтверждают необходимость концепции развития средств индивидуальной защиты органов (СИЗОД) военного назначения, а также способствуют дальнейшей модернизации существующих противогазов фильтрующего типа специального назначения [1–5].

В настоящей работе предлагаются новые технические решения в области модернизации СИЗОД фильтрующего типа и рекомендации по их дальнейшему совершенствованию, а именно:

- совместить средства химической разведки (ХР) и СИЗОД, что позволит оснастить каждого военнослужащего средством ХР, формировать сигналы о факте обнаружения отравляющих веществ (ОВ), аварийно химически опасных веществ (АХОВ), автоматически передавать данные в пункт управления и координации по типу обнаруженных веществ и их концентраций;

- разработать индикаторы окончания срока службы фильтрующе-поглощающих коробок (ФПК) с целью их своевременной замены [11];

- разработать экспресс-способ неразрушающего контроля состояния проницаемости угольных слоев ФПК.

Реализация данных решений возможна с развитием современных газоаналитических решений, основу которых составляют полупроводниковые наноструктурные сенсоры [6, 12–15].

В настоящее время разработана и активно применяется технология изготовления газочувствительных сенсоров на основе оксидов, обладающих полупроводниковыми свойствами (SnO_2 , TiO_2 , WO_3 , V_2O_5 , In_2O_3 , Fe_2O_3 , Cu_2O , CuO , ZnO , CdO и др.).

Газочувствительные элементы — сенсоры обладают высокой чувствительностью обнаружения, селективностью при анализе многокомпонентных смесей, стабильностью продолжительной работы, сниженными массо-габаритными параметрами и потребляемой мощностью (рис. 1) [8, 9, 10].

Принцип действия полупроводниковых сенсоров основан на эффекте изменения электропроводности газочувствительного материала при хемосорбции молекул из газовой фазы.

Основные особенности разработанных газоаналитических решений, соответствуют современным требованиям газового анализа:

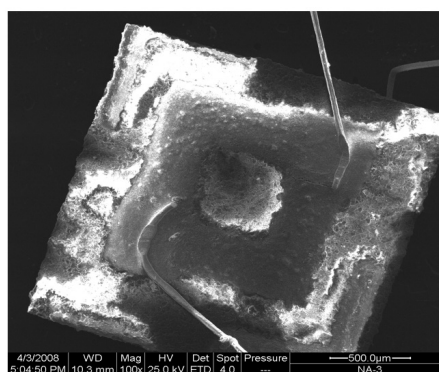
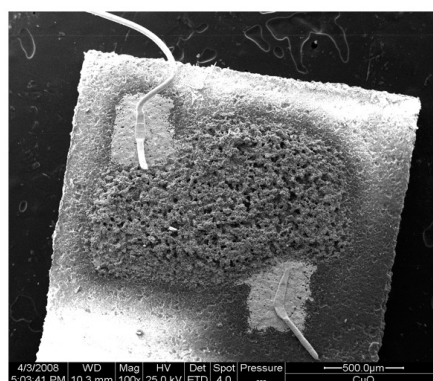


Рис. 1. Электронные микроскопические изображения поверхности полупроводниковых газочувствительных сенсоров SnO_2 , легированных оксидом сурьмы (III) (Изображения получены при увеличении $\times 5000$ и $\times 100$ с помощью растрового микроскопа «Quanta 200»)

- обнаружение широкого перечня ОВ, АХОВ (более 200 наименований) и их концентраций в режиме реального времени;

- чувствительность обнаружения на уровне «следовых» концентраций;

- унифицированные схемотехнические решения и программно-математическое обеспечение;

- аэродинамическая система отбора проб воздуха;

- формирование сигналов по факту обнаружения аналитов с возможностью индикации (в т.ч. цифровой формат значения концентраций): световой, звуковой, вибрационный сигнал;

- формирование сигнала состояния в количественном и относительном форматах по уровням предупреждения: «Норма», «Малоопасно» и «Опасно»;

- передача данных в режиме реального времени в органы сбора и обработки информации;

- архивирование и хранение результатов оперативного контроля.

Экспериментальный образец

С целью совмещения системы ХР в СИЗОД создан экспериментальный образец газоаналитического устройства, которое интегрировано с ФПК противогаса ПМК-С. Технические и основные аналитические характеристики приведены в таблице, изображение СИЗОД в составе боевой экипировки военнослужащего, 3D модель и некоторые важные элементы показаны на рис. 2.

Схемотехническое решение газового контроллера OEM типа сконструировано на основе коробки ФПК-7ПБ. Служебные оповещения ре-

ализованы с помощью микроконтроллера в звуковом (отключаемом) и световом форматах. В качестве светового оповещения применено LED-устройство (RGB-светодиод), обеспечивающее максимальную эргономичность и информативность, а также низкую потребляемую мощность, что значительно повышает время работы газоаналитической системы. Питание системы осуществляется от АКБ, выбираемой в зависимости от условий работы и области применения.

Для повышения функциональных возможностей газоаналитическая система может комплектоваться:

Таблица

Основные характеристики экспериментальной системы, на основе полупроводниковых сенсоров, предназначенной для обнаружения ОБ, АХОВ и определения их концентраций

Основные технические характеристики экспериментального образца	Параметры	Примечание
Масса датчика с автономной системой питания (с АКБ), не более, г	30–50	Масса и габариты определяются конструктивом размещения
Габариты, не более, мм	75×55×15	
Время непрерывной работы от АКБ	1000 измерений, или от 3 до 5 часов	Время работы определяется типом применяемой АКБ
Вероятность безотказной работы	не менее 0,95	за 2000 часов непрерывной работы
Атмосферное давление, мм рт. ст.	10–900	
Относительная влажность, %	10–98	
Температурный режим, °С	от минус 20 до плюс 50	
Индикация	звуковая	низкочастотным звуком, передаваемым в головной телефон военнослужащего по ВЧ-уплотнению штатного канала связи
	вибрация	вибрацией на соответствующей частоте
	световая	подсветкой рассеянным светом, соответствующим по цветовой гамме уровню опасности
Количество каналов, входящих в мультисенсорную систему	кратно 4	в соответствии с числом микрочипов, размещаемых на несущей плате
Интерфейс обмена	RS 485	определяется устройством приема и хранения
Канал обмена	USB 2.0	
Радиоканал	UART, RS232, Ethernet	
Емкость встроенного архива	2 Гб	
Быстродействие, с	1–10	зависит от измеряемой концентрации
Чувствительность, мг/л:		приведены результаты по испытаниям сенсоров на базе лабораторий ФБУ «33 ЦНИИИ МО РФ», ОАО «Химвавтоматика», ОАО «Смоленск аналитприбор», «АС-DC» (США)
по ФОВ	10 ⁻⁸ –10 ⁻⁷	
по Н	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁵	
по L	10 ⁻⁴ –10 ⁻³	
по CR/CS	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴	
по АХОВ, КРТ	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴	

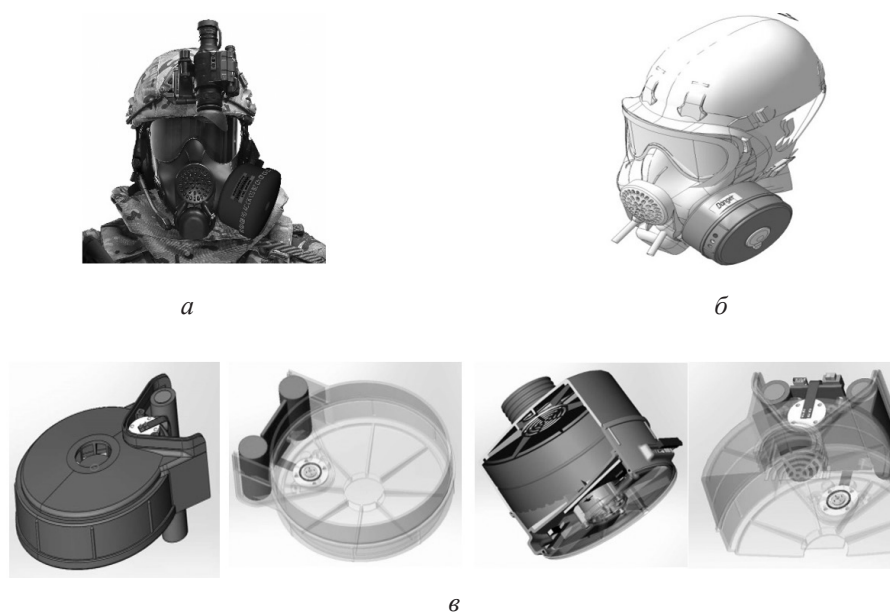


Рис. 2. Внешний вид экспериментального образца с OEM решением на основе сенсоров, интегрированных с ФПК противогаса ПМК-С: а — ФПК в комплекте с боевой экипировкой; б — 3D модель; в — элементы OEM устройства контроля состояния ФПК

- энергонезависимой памятью (не менее 2 GB) для сбора и хранения данных, полученных за период работы до полного разряда АКБ;
- интерфейсом RS 485 (или любым другим) для подключения к ПК для копирования данных, настройки и подключения к локальной сети;
- зарядным устройством.

Физическая модель устройства

Физическая модель состояния ФПК представлена стандартной схемой, принятой для контроля фильтрующих устройств и систем, показана на рис. 3.

Принцип работы экспериментальной системы состоит в следующем:

- камеры с идентичными сенсорами установлены на входе и выходе ФПК;
- канал (External) определяет состояние вдыхаемого воздуха и является опорно-сравнительным;
- канал (Internal) предназначен для контроля отфильтрованного воздуха в тракте дыхания.

Условия измерения — мощность нагрева, время экспозиции выбираются для проведения интегрального анализа веществ окислителей и восстановителей, содержащихся в окружающем воздухе. Принятие решение о состоянии фильтрующего материала ФПК принимается по результатам корреляционного анализа и методу динамического сравнения, реализованного в режиме реального времени.

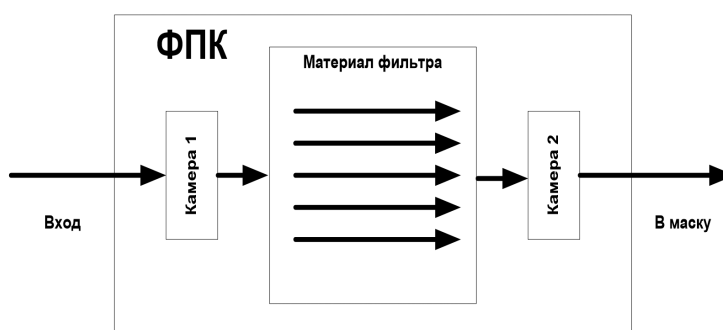


Рис. 3. Схема модели контроля ФПК на базе полупроводниковых сенсоров

Корреляционный анализ позволяет рассчитать коэффициент корреляции и определить полноту зависимости между сравниваемыми величинами. Анализ проводится по значениям, измеренным в текущий момент времени каждым сенсором, входящим в систему при равных условиях.

Пусть U — текущие значения потенциала, измеренного на сенсоре при хемосорбции на входе в ФПК, V — текущие значения потенциала, измеренного сенсором после фильтрующего материала. Коэффициент корреляции между рядами U и V равен:

$$\rho = E \left[\frac{U - \langle U \rangle}{\sigma_U} \cdot \frac{V - \langle V \rangle}{\sigma_V} \right].$$

Абсолютная величина коэффициента корреляции $|\rho| \leq 1$. Так как процесс формирования изменения электропроводности при хемосорбции является эргодическим, то несмещенными и состоятельными оценками служат средние значения и дисперсии:

$$\langle U \rangle = \frac{1}{t} \sum U(t), \quad \langle V \rangle = \frac{1}{t} \sum V(t),$$

и

$$\sigma_U^2 = \frac{1}{t-1} \sum (U(t) - \langle U(t) \rangle)^2,$$

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{t-1} \sum (V(t) - \langle V(t) \rangle)^2.$$

Для эргодических процессов коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = \frac{1}{T-1} \cdot \frac{1}{\sigma_U \sigma_V} \sum (U - \langle U \rangle)(V - \langle V \rangle).$$

Динамика аналитического сигнала за время проведения лабораторных исследований насыщения ФПК примесями веществ-загрязнителей показала, что коэффициент корреляции выходного и входного сигналов стремится к 1, что соответствует снижению емкости фильтрующего элемента. Очевидно, что контроль коэффициента корреляции в реальном масштабе времени позволяет определить состояние ФПК. Данная модель позволяет установить пределы изменения коэффициента корреляции для принятия решения и формирования соответствующего оповещения.

Эксперимент

Измерения проведены с помощью экспериментальной установки, которая состоит из ФПК, побудителя расхода, сенсорной OEM-системы и источника микропотока ацетона с исходной концентрацией 2,5 мг/м³. Составные части макета приведены на рис. 5.

Помимо корреляционной модели для оценки состояния фильтрующего материала эффективно применяется динамический анализ, проводимый по значениям дисперсионного преобразования в каждом аналитическом канале, или по концентрации вещества — маркера.

Рассмотрим случай контроля по веществу маркеру. Если принять за C_0 концентрацию примеси маркера в воздухе (на входе ФПК), а C_i обозначить концентрацию, измеренную на выходе фильтра, то для принятия решения удобна величина R_i , рассчитанная в процентах:

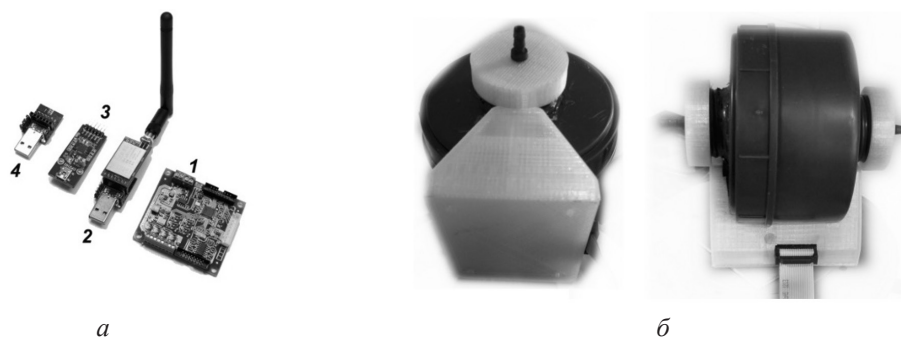


Рис. 5. Экспериментальный макет для контроля ФПК в лабораторных условиях:
 а — OEM-устройство измерения: 1 — плата управления; 2 — модуль радиоканала;
 3 — преобразователь напряжения питания; 4 — RS485 по USB шине;
 б — ФПК со встроенными сенсорами и каналами входа/выхода паровоздушной смеси

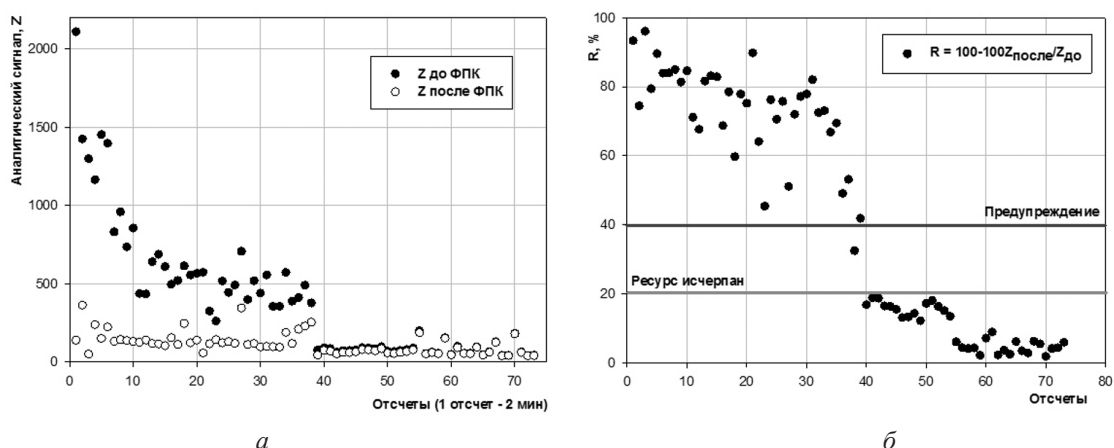


Рис. 6. Результаты работы OEM-системы по контролю ФПК: а — аналитические сигналы до и после ФПК; б — результат динамической обработки в реальном масштабе времени

$$R_i = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100 \% \text{ или } R_i = 100 - \frac{100C_i}{C_0}.$$

Если $C_i \rightarrow C_0 \Rightarrow R_i \rightarrow 0$, то есть, фильтрующий материал полностью насыщен и непригоден для использования, если же $C_i < C_0 \Rightarrow R_i \rightarrow 100\%$, то ресурс работы ФПК высок и им можно пользоваться. При $\Delta C_{0-i} \approx Q$ (Q — текущее состояние фильтра), то пользователю известна стадия насыщения ФПК. Таким образом, зная свойства фильтрующего материала, можно задать некоторое значение Q , при котором ФПК необходимо сменить.

В случае многокомпонентных примесей в окружающем воздухе для повышения достоверности и надежности контроля целесообразно для расчетов использовать аналитический сигнал Z , рассчитанный в соответствии с алгоритмом работы газочувствительных сенсоров: $Z = (U(t) - \langle U(t) \rangle)^2$, где U — измеряемое напряжение, $\langle U \rangle$ — накопленное среднее значение измеряемого напряжения за время t и рассчитанное как $\langle U(t) \rangle = \frac{1}{t} \sum U(t)$.

Интегральная концентрация примесей в окружающем воздухе: $C_i = \det \| \mathbf{A} \| Z_i + B_i$. Значения $\det \| \mathbf{A} \|$ и B получены в результате градуировки сенсора, проведенной по «чистым» веществам, $\det \| \mathbf{A} \|$ — значения определителя матрицы, состоящей из коэффициентов уравнений связи, B_i — значения порога чувствительности обнаружения i -го «чистого» вещества.

Таким образом, задавая значения R_i можно контролировать состояние ФПК на любой ста-

дии эксплуатации средства защиты. На рис. 6 приведен пример контроля фильтрующего материала с помощью OEM-устройства, состоящего из двух каналов, установленных на входе фильтра и на его выходе.

В качестве побудителя расхода применен насос, прокачивающий 1200 мл/мин, что позволяет получить результаты с доверительной вероятностью 0,99 при времени экспозиции 30 с. Естественно, в реальных условиях алгоритм применения полупроводниковых сенсоров несколько изменится, так как поток воздуха будет создаваться дыханием человека. Так как один такт дыхания не превышает 2–3 с, необходимо повысить частоту опроса аналитических каналов. Схемотехническое решение позволяет проводить измерения с частотой до 128 Гц (128 измерений в секунду). Усреднение значений, полученных в течение 1–3 с, повышают точность динамических расчетов и снижают общую погрешность принятия решения по состоянию ФПК.

Выводы

Групповая технология изготовления сенсоров и унифицированное схемотехническое решение дают возможность создать газоаналитическое устройство, интегрированное с ФПК, позволяющее контролировать состояние фильтрующего материала. На основе OEM-решений разработан стенд для контроля состояния и качества ФПК на стадии их производства.

Увеличение количества аналитических каналов позволяет не только контролировать состояние ФПК по интегральным признакам, но и про-

водить селективный контроль по веществам, присутствующих в окружающем воздухе.

С целью повышения эффективности защиты органов дыхания военнослужащих и повышения оперативности при проведении химической разведки и выполнения боевой задачи, авторами данной статьи предлагается разместить OEM-устройство, основанное на базе полупроводниковых сенсоров, в ФПК противогазов, принятых на вооружение. Не менее актуально проводить оперативный контроль срока службы противогазовых коробок.

Литература

1. Официальный сайт ОАО «АРТИ-Завод» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.arti.com.ru/html> (дата обращения 28.02.2017).
2. Кирк П.Э. Обеспечение промышленных предприятий России современными средствами индивидуальной защиты органов дыхания / П.Э. Кирк, Ю.А. Романов, И.С. Кошелев // Сб. матер. Российской научно-практической конференции «Стратегия развития научно-производственного комплекса РФ в области разработки и производства систем жизнеобеспечения и защиты человека в условиях химической и биологической опасности». — Тамбов. 2009. С. 148–150.
3. Болясов Д.А. Новые средства индивидуальной защиты органов дыхания военнослужащих внутренних войск МВД России / Д.А. Болясов, А.Г. Глащенко // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Современные технологии обеспечения общественной безопасности». — Минск. 2014. С. 64–66.
4. Бендик В.М. Новые средства индивидуальной защиты органов дыхания подразделений внутренних войск МВД России / В.М. Бендик, Д.А. Болясов // Тезисы докладов 17 Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». — Санкт-Петербург. 2014. С. 177–182.
5. Официальный сайт фирмы «Avon Protection Systems». URL:// www.avon-protection.com/indexpro.htm.06.04.2016.
6. Эль-Салим С.З. Перспективы применения полупроводниковых мультисенсорных устройств в газовом анализе / С.З. Эль-Салим, О.В. Черемисина, Е.А. Черемисина // Нанотехнологии. 2008. № 1. С. 6–21.
7. Исследование возможности интеграции газоанализаторов, дозиметров, спектрометров и других устройств на борту беспилотных летательных аппаратов для решения задач радиационной, химической разведки в интересах внутренних войск МВД России: отчет о НИР (заключ.) / Исп.: С.З. Эль-Салим, Д.А. Болясов, В.В. Зинковский и др. — Саратов: СВКИ ВВ МВД России. 2016. 123 с.
8. Игнатьев А.А., Черемисин С.З., и др. Комплексный контроль паров ракетных топлив не-симметричного диметилгидразина и тетраоксида азота // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 7 (8). С. 190–199.
9. Игнатьев А.А., Малышев А.В., и др. Многопараметрическая система определения качества воды // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № S8 (9). С. 50–62.
10. Никонов В.С., Игнатьев А.А., Гжибовский Н.Э., и др. Комплексное определение не-симметричного диметилгидразина в окружающей среде // Экологические системы и приборы. 2020. № 10. С. 30–38.
11. Никонов В.С., Игнатьев А.А., и др. Метод контроля токсичных химикатов в водных растворах по газоаналитическим измерениям концентрации насыщенного пара растворенных веществ // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 7–8 (145–146). С. 82–89.
12. Коновалов В.Б., Игнатьев А.А., и др. Автоматическая система аналитического контроля качества воды для объектов ВС РФ // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2021. № 1 (13). С. 201–211.
13. Путилин П.А., Никонов В.С., Гжибовский Н.Э., Игнатьев А.А., и др. Контроль КРТ на объектах инфраструктуры МТО ВС РФ // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 11 (12). С. 229–241.
14. Коновалов В.Б., Саркисов С.В., Эль-Салим С.З. Корреляционный метод идентификации вещества // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2021. № 2 (14). С. 9–21.
15. Саркисов С.В., Эль-Салим С.З., Игнатьев А.А. Применение систем оригинального оборудования (ОЕМ-систем) в полевых аналитических лабораториях // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 2 (14). С. 22–31.

References

1. Official site of JSC «ARTI-Zavod» [Electronic resource]. Access mode: <http://www.arti.com.ru/html> (date of access 28.02.2017).
2. Kirk P.E. Provision of industrial enterprises of Russia with modern means of individual protection of respiratory organs / P.E. Kirk, Yu.A. Romanov, I.S. Koshelev // Sat. mater. Russian scientific and practical conference «Strategy for the development of the scientific and industrial complex of the Russian Federation in the development and production of life support and human protection systems in conditions of chemical and biological hazards.» — Tambov. 2009. P. 148–150.
3. Bolyasov D.A. New means of individual protection of respiratory organs of military personnel of the internal troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia / D.A. Bolyasov, A.G. Glashchenko // Abstracts of the International Scientific and Practical Conference «Modern Technologies for Ensuring Public Security». — Minsk. 2014. P. 64–66.
4. Bendik V.M. New means of individual protection of respiratory organs of units of the internal troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia / V.M. Bendick, D.A. Bolyasov // Abstracts of the 17th All-Russian Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Protection and Security». — St. Petersburg. 2014. P. 177–182.
5. Official website of Avon Protection Systems. URL: // www.avon-protection.com/indexpro.htm. 06.04.2016.
6. El Salim S.Z. Prospects for the use of semiconductor multisensor devices in gas analysis / S.Z. El-Salim, O.V. Cheremisina, E.A. Cheremisin // Nanotechnology. 2008. № 1. P. 6–21.
7. Investigation of the possibility of integrating gas analyzers, dosimeters, spectrometers and other devices on board unmanned aerial vehicles to solve radiation and chemical reconnaissance tasks in the interests of the internal troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia: research report (conclusion) / App.: S.Z. El-Salim, D.A. Bolyasov, V.V. Zinkovsky et al. — Saratov: SVKI Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2016. 123 p.
8. Ignatiev A.A., Cheremisin S.Z., et al. Complex control of vapors of rocket fuels of asymmetric dimethylhydrazine and nitrogen tetroxide // Actual problems of military scientific research. 2020. № 7 (8). P. 190–199.
9. Ignatiev A.A., Malyshev A.V., et al. Multiparameter system for determining water quality // Actual problems of military scientific research. 2020. № S8 (9). P. 50–62.
10. Nikonov V.S., Ignatiev A.A., Gzhibovskiy N.E., et al. Complex determination of asymmetric dimethylhydrazine in the environment // Ecological systems and devices. 2020. № 10. P. 30–38.
11. Nikonov V.S., Ignatiev A.A., et al. Method for monitoring toxic chemicals in aqueous solutions by gas analytical measurements of the concentration of saturated vapor of dissolved substances // Military Engineering. Issue 16. Counter-terrorism technical devices. № 7–8 (145–146). 2020. P. 82–89.
12. Konovalov V.B., Ignatiev A.A., et al. Automatic system of analytical control of water quality for objects of the Armed Forces of the Russian Federation // Actual problems of military scientific research. 2021. № 1 (13). P. 201–211.
13. Putilin P.A., Nikonov V.S., Gzhibovskiy N.E., Ignatiev A.A., et al. Control of SRT at the infrastructure facilities of the logistics equipment of the RF Armed Forces // Actual problems of military scientific research. 2020. № 11 (12). P. 229–241.
14. Konovalov V.B., Sarkisov S.V., El-Salim S.Z. Correlation method of substance identification // Actual problems of military scientific research. 2021. № 2 (14). P. 9–21.
15. Sarkisov S.V., El-Salim S.Z., Ignatiev A.A. Application of original equipment systems (OEM systems) in field analytical laboratories // Actual problems of military scientific research. 2020. № 2 (14). P. 22–31.