

О ПРИМЕНЕНИИ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОПЛИВА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

© 2021

- А. Б. Булгаков** кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности; Амурский государственный университет, г. Благовещенск; bgd_2020@mail.ru
- С. П. Ващук** кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; amurgermovvod@mail.ru
- Р. А. Панышин** аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; panshinroman2016@yandex.ru

Показана необходимость организации индивидуального инструментального контроля содержания ракетного топлива и его продуктов в воздушной среде предприятий ракетно-космической отрасли. На сегодняшний день не выявлено газоанализаторов, представленных на российском рынке, обеспечивающих индивидуальный инструментальный контроль концентраций гептила и его производных в воздухе рабочей зоны. Остаётся актуальной задача экспрессного, автоматического, селективного и одновременного контроля одним прибором содержания паров гептила и производных его трансформации в воздушной среде производственных помещений и замещения импортных газоанализаторов. Показано, что решение поставленной задачи возможно на базе оптического абсорбционного метода. Сформулированы требования, которым должен отвечать газоанализатор. Определены ориентировочные длины волн, на которых возможно производить одновременное измерение концентраций гептила и его производных в воздушной пробе. Намечены пути реализации индивидуальных газоанализаторов, имеющих небольшие массогабаритные характеристики. Предложены структурные схемы инфракрасных газоанализаторов: многоканальная, одноканальная (с частотной модуляцией излучения). Сформулированы задачи дальнейших исследований.

Гептил; производные трансформации гептила; воздух рабочей зоны; инфракрасный спектр; оптический абсорбционный метод газового анализа

Цитирование: Булгаков А.Б., Ващук С.П., Панышин Р.А. О применении газоанализаторов для контроля топлива в воздушной среде предприятий ракетно-космической отрасли // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 110-118. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-110-118

Введение

В настоящее время несимметричный диметилгидразин (НДМГ, гептил) используется в качестве ракетного топлива [1], являясь чрезвычайно токсичным веществом первого класса опасности и обладает способностью накапливаться в природных экосистемах. Производными трансформации гептила являются высокотоксичные и канцерогенные продукты (например, диметиламин (2-й класс опасности), формальдегид (2-й класс опасности), диметилнитрозамин (1-й класс опасности) и пр.) [2; 3].

В связи с тем, что гептил и продукты его трансформации являются веществами 1-го и 2-го классов опасности, возникает задача их инструментального контроля в воздушной среде, в том числе и в воздухе рабочей зоны, для обеспечения безопасности

работников, имеющих контакт с ними. В соответствии с ГОСТ 12.005-88 периодичность контроля устанавливается в зависимости от класса опасности вредного вещества, например, для 1-го класса (гептил по СанПиН 1.2.3685-21) – не реже 1 раза в 10 дней. По запаху нос человека может обнаружить в воздухе концентрацию паров гептила, которая в 50 раз выше предельно допустимой концентрации (ПДК). ПДК гептила в воздухе рабочей зоны равна $0,1 \text{ мг/м}^3$ (СанПиН 1.2.3685-21).

Несмотря на то, что НПАОП 35.3-1.14-60 «Временные правила по технике безопасности при работе с гептилом» не определяют необходимость в индивидуальном инструментальном контроле, в соответствии с обеспечением дополнительных мер безопасности, защиты жизни и здоровья персонала, задействованного в проведении работ с гептилом, конструкторскими и эксплуатирующими организациями могут быть приняты соответствующие технические регламенты и решения, определяющие применение помимо стационарных систем контроля опасных накоплений в воздушной среде рабочих зон и индивидуальных (носимых) средств контроля – портативных газоанализаторов. Такой газоанализатор должен быть индивидуальным, а следовательно иметь небольшие габариты и массу (как правило, меньше 1 кг), простым в эксплуатации. В результате проведенного анализа газоанализаторов, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, для контроля концентрации гептила и его производных в воздухе рабочей зоны на российском рынке таких приборов не выявлено. Предлагаемые рынком газоанализаторы ДАРТ различных модификаций и система дистанционного контроля воздушной среды СДКВС-1М [4; 5] являются стационарными и рассчитаны на измерение концентрации только гептила. В газоанализаторах ДАРТ (масса 20 кг) заложен электрохимический принцип измерений. Система СДКВС-1М (масса только одного датчика в зависимости от исполнения не менее 5,5 кг) построена на базе датчиков ДКВС-1М, представляющих собой инфракрасные Фурье-спектрометры среднего спектрального разрешения. Предприятия ракетно-космической отрасли приобретают ограниченные партии зарубежных индивидуальных газоанализаторов для обеспечения дополнительных мер безопасности, защиты жизни и здоровья персонала.

В связи с этим на данный момент времени остаётся актуальной задача экспрессного, автоматического, селективного и одновременного контроля одним прибором содержания паров гептила и производных его трансформации в воздушной среде производственных помещений и замещения импортных газоанализаторов.

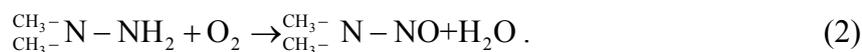
Целью работы является исследование возможности разработки газоанализатора для контроля экспрессного, автоматического, селективного и одновременного контроля одним прибором содержания паров гептила и производных его трансформации в воздушной среде производственных помещений.

Трансформация гептила в воздухе

Химические свойства гептила обусловлены наличием у обоих атомов азота двух неспаренных электронов, которые делают его весьма реакционноспособным соединением. В многокомпонентной системе, какой является система «гептил – атмосферный воздух», где кроме кислорода находятся активные компоненты, такие как углекислый газ, углеводороды, интенсивность превращения НДМГ ($(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2$) весьма высокая. Требуется не более двух суток для того, чтобы НДМГ практически полностью превратился в дочерние компоненты, что способствует значительному затруднению измерения его концентраций в атмосферном воздухе. Формальдегид образуется, как самый высокорекреационный компонент, вследствие окисления кислородом воздуха радикала гептила CH_3 :



Диметилнитрозамин образуется вследствие окисления гептила:



При наличии в воздухе CO, CO₂ окисление НДМГ проходит с высоким образованием диметиламина:



В табл. 1 [3] приведена информация об изменении со временем концентрации гептила и его производных в атмосферном воздухе. С течением времени концентрация одних компонентов в воздушной среде уменьшается вплоть до полного исчезновения (гептил, нитрозодиметиламин, триметилгидразин), других – увеличивается (диметиламин, диметилметиленигидразин), третьих – сначала увеличивается, а затем уменьшается (тетраметилтетразен).

Таблица 1. Динамика содержания гептила и его производных в атмосферном воздухе

Наименование вещества	Гептил исх., % масс.	Состав продуктов, % масс.; через:				
		1 час	24 часа	3 суток	8 суток	50 суток
Гептил	99,68	83,12	0,05	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Диметиламин	0,13	4,45	12,40	10,00	6,27	4,00
Диметилметиленигидразин	0,14	11,94	76,76	78,34	80,11	86,95
Нитрозодиметиламин	<0,0001	0,18	0,72	0,31	0,13	отсутствует
Тетраметилтетразен	0,05	0,31	3,03	3,30	3,51	0,70
Триметилгидразин	отсутствует	<0,01	<0,01	0,05	0,16	отсутствует

Из анализа опубликованных в открытой печати источников [1 – 3] следует:

– гептил неустойчив в атмосфере, благодаря реакции с кислородом он переходит в ряд дочерних продуктов;

– основными продуктами превращения гептила при контакте с кислородом воздуха являются: диметиламин, формальдегид, диметилнитрозамин;

– при длительном нахождении гептила в атмосферном воздухе обнаруживаются: триметиламин, диметилметиленигидразин, диметилгидразон уксусного альдегида, диметиламиноацетонитрил, тетраметилтетразен.

Таким образом, при разработке многокомпонентного газоанализатора для контроля в воздухе рабочей зоны гептила и его продуктов трансформации на первом этапе целесообразно ограничить перечень контролируемых веществ и включить в него:

- гептил;
- диметиламин;
- формальдегид;
- диметилнитрозамин.

Метод газового анализа

Одним из методов, обеспечивающих многокомпонентный газовый анализ, является оптический абсорбционный метод. Реализация газоанализатора на базе этого метода позволит [6]:

1. Обеспечить многокомпонентный анализ.
2. Предусмотреть контроль работоспособности газоанализатора (например, выход из строя или изменения режимов работы отдельных узлов).
3. Предусмотреть сигнализацию (звуковую, световую), предупреждающую оператора о проблемах в работе газоанализатора и о достижении измеряемых концентраций ПДК.
4. Предусмотреть вывод информации на экран прибора о возникших в автоматическом газоанализаторе проблемах при проведении измерений (например, в газовой смеси содержатся компоненты, которые не учтены в математической модели прибора).
5. Результаты измерений, выдаваемые газоанализатором, пересчитывать к нормальным условиям (которые определены для воздуха рабочей зоны).
6. Предусмотреть контроль метрологических характеристик газоанализатора (чувствительность, положение нулевой точки шкалы прибора и т.д.).
7. Предусмотреть автоматическую коррекцию результата измерения в случае наличия сопутствующих компонентов в анализируемой газовой смеси, влияющих на результат измерения.
8. Предусмотреть автоматическую коррекцию результата измерения, которая учитывает наличие влияющих факторов окружающей среды на результат измерения.
9. Предоставлять результаты измерений, выдаваемых газоанализатором, с учётом неопределённости (при уровне доверия 0,95).

Оптический абсорбционный метод

Оптический абсорбционный метод основан на свойстве веществ избирательно поглощать часть проходящего через них электромагнитного излучения. Количественное соотношение между концентрацией определённого компонента и интенсивностью поглощающего излучения определяется законом Бугера – Ламберта – Бера [9]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-L \sum_{i=1}^n K_i(\lambda) C_i}, \quad (4)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность излучения, прошедшего через слой вещества толщиной L ; $I_0(\lambda)$ – интенсивность излучения до поглощения излучения веществом; $K_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения для i -го компонента; C_i – концентрация i -го компонента.

Вследствие поглощения излучения при прохождении его через слой вещества интенсивность излучения уменьшается и тем больше, чем выше концентрация поглощающего вещества.

Наиболее информативны для многоатомных молекул инфракрасные спектры [2; 7 – 10]. Анализ инфракрасных спектров гептила, диметиламина, формальдегида, диметилнитрозамина показал, что измерение концентраций этих компонентов возможно производить на длинах волн, приведённых в табл. 2. При этом следует отметить, что при математическом моделировании модели газоанализатора следует эти длины волн уточнить с учётом многокомпонентности анализа, наличия в воздухе рабочей зоны паров воды и других мешающих компонентов.

Таблица 2. Ориентировочные волновые числа, на которых возможно производить измерение концентраций гептила и его производных в воздушной пробе

№ п/п	Наименования вещества	Волновое число ν , см ⁻¹
1	Диметилнитрозамин	1444
2	Диметиламин	1533
3	Гептил	1607
4	Формальдегид	1800

Структурные схемы газоанализаторов

Для выделения необходимого спектрального интервала в оптических абсорбционных газоанализаторах применяют интерференционные фильтры [11] и (или) фильтры Фабри-Перо [12]. Для измерения в воздушной пробе концентраций гептила, диметиламина, формальдегида, диметилнитрозамина возможна реализация двух схем (многоканальной и одноканальной).

Многоканальная схема оптического абсорбционного газоанализатора приведена на рис. 1. Для реализации такой схемы количество фильтров должно быть равно количеству компонентов плюс один. Принцип действия газоанализатора заключается в следующем: с помощью вращающегося модулятора 1 и фильтров 4 постоянное инфракрасное излучение от источника излучения (ИИ) преобразуется в пульсирующее излучение, проходящее через газовую кювету 3. В модулятор 1 встроен оптический фильтр, который формирует излучение через газовую кювету 3, которое не поглощается компонентами анализируемой газовой смеси. Относительно этого аналитического сигнала проводится обработка аналитических сигналов, сформированных с помощью фильтров, которые пропускают электромагнитные волны в соответствии с табл. 2. В газовой кювете 3 наличие определяемых компонентов приводит к поглощению электромагнитных волн в диапазонах в соответствии с табл. 2. С приёмника излучения (ПИ, например, пироэлектрический приёмник излучения) аналитические электрические сигналы поступают на вход блока обработки сигнала (БОС). В БОС по специальному алгоритму выполняется вычисление концентраций гептила и его производных с учётом положения модулятора с фильтрами 1. Положение модулятора определяют датчики 5.

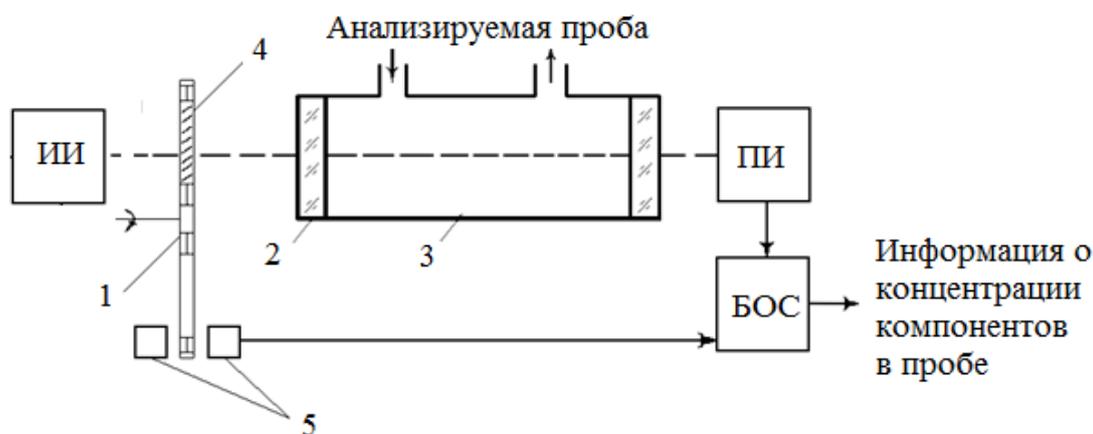


Рис. 1. Структурная схема многоканального инфракрасного газоанализатора:
 1 – модулятор со встроенными фильтрами; 2 – окно газовой кюветы; 3 – газовая кювета;
 4 – фильтры для выделения требуемых спектральных интервалов; 5 – датчики модулятора

Другой возможный вариант – это разработка газоанализатора на базе структурной схемы, приведённой в [11] (одноканальный). В данной схеме пироэлектрический приёмник и оптический фильтр заменяются на пироэлектрический приёмник с перестраиваемым фильтром. В основе перестраиваемого фильтра компании InfraTec лежит микроинтерферометр Фабри-Перо [12]. Смещение центральной длины волны перестраиваемого фильтра обеспечивается за счёт изменения приложенного к фильтру напряжения $U(t)$. Одноканальная схема оптического абсорбционного газоанализатора приведена на рис. 2. Принцип действия газоанализатора заключается в следующем: при отсутствии определяемых компонентов в газовой пробе на выходе приёмника излучения 3 отсутствует и аналитический сигнал. При появлении определяемых и мешающих компонентов в анализируемой пробе величина и форма сигнала будут определяться концентрациями компонентов и спектральными коэффициентами поглощения компонентов в диапазоне сканирования фильтра Фабри-Перо. Производя обработку сигнала по определённому алгоритму, например применяя гармонический анализ, получим информацию о концентрации определяемых компонентов в пробе. Сигнал $U(t)$ не только обеспечивает смещение центральной длины волны перестраиваемого фильтра, но и синхронизацию работы ПИ с фильтром Фабри-Перо с БОС. ПИ с фильтром Фабри-Перо LFP-5580C-337 позволяет обеспечить сканирование в диапазоне от 1818 до 1250 см^{-1} [12], что обеспечит измерение рассматриваемых компонентов в диапазонах, приведённых в табл. 2.

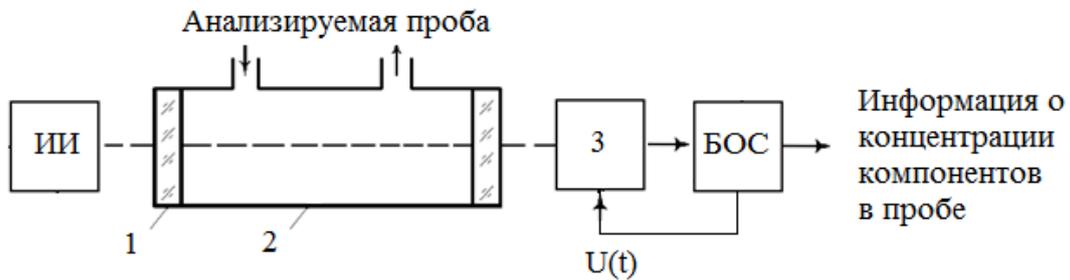


Рис. 2. Структурная схема одноканального инфракрасного газоанализатора: 1 – окно газовой кюветы; 2 – газовая кювета; 3 – ПИ с фильтром Фабри-Перо

Такой подход позволит реализовать в полном объёме требования к современным газоанализаторам, которые были перечислены ранее в пп. 1 – 9.

В предложенных структурных схемах газоанализаторов в БОС заложены алгоритмы обработки аналитического сигнала, обеспечивающие инвариантность выходного сигнала от влияющих факторов, например флуктуаций интенсивности ИИ, изменения пропускания оптического тракта и т.п. и учёта сопутствующих компонентов в анализируемой смеси.

В конечном итоге газоанализатор должен обеспечить:

- избирательное измерение концентрации вредного вещества в присутствии сопутствующих компонентов на уровне $\leq 0,5$ ПДК;
- суммарная неопределённость измерений концентраций вредного вещества не должна превышать $\pm 25\%$;
- границы допустимой неопределённости результатов измерений концентраций вредного вещества в воздухе рабочей зоны, равных ПДК или более, должны составлять $\pm 25\%$ от измеряемой величины при уровне доверия 0,95.

Заключение

1. По результатам исследований установлено, что на базе оптического абсорбционного метода возможна разработка многокомпонентного газоанализатора для измерений концентраций гептила, диметиламина, формальдегида, диметилнитрозамина в воздухе рабочей зоны.

2. Для оптимизации параметров предлагаемых структурных схем газоанализаторов необходимо разработать математические модели и определить метрологические характеристики (диапазон измерения, погрешность средства измерения).

3. Необходимо обосновать приемлемый вариант структурной схемы газоанализатора, разработать макет газоанализатора и произвести его испытания в соответствии с ГОСТ 13320-81 «Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия».

Библиографический список

1. О токсичности гептила / под ред. Л.С. Ягужинского. М.: ИПХФ РАН, 2014. 128 с.
2. Колесников С.В. Окисление несимметричного диметилгидразина (гептила) и идентификация продуктов его превращения при проливах. Новосибирск: Изд-во СибАК, 2014. 110 с.
3. Хмелева М.В. Экологические аспекты химической активности несимметричного диметилгидразина в инертной среде, в присутствии кислорода, воды, атмосферного воздуха и при воздействии электрического разряда. Дис. ... канд. хим. наук. Нижний Новгород, 2015. 145 с.
4. Система дистанционного контроля воздушной среды СДКВС-1М. http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/spec_tehnika/sdkvs_1m/.
5. ДАРТ датчик-газоанализатор компонентов ракетного топлива (КРТ) стационарный. <https://www.gazoanalizators.ru/DART.html>.
6. Булгаков А.Б., Аверьянов В.Н. Пути совершенствования оптических абсорбционных газоанализаторов для решения задач в области техносферной безопасности // Материалы международной научно-практической конференции «Природообустройство и строительство: наука, образование, практика» (08 ноября 2017 г., Благовещенск). Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2017. С. 32-38.
7. Годжаева А.Р. Синтез полиэлектrolита из эпихлоргидрина и диметиламина и его применение при очистке сточных вод. Дис. ... канд. хим. наук. Уфа, 2014. 130 с.
8. Набиев Ш.Ш., Ставровский Д.Б., Палкина Л.А., Збарский В.Л., Юдин Н.В., Голубева Е.Н., Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Собакинская Е.А., Черняева М.Б. Спектрохимические особенности некоторых бризантных взрывчатых веществ в парообразном состоянии // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 273-285.
9. Булгаков А.Б., Корниевская С.А. Исследование возможности разработки газоанализатора для контроля гептила и производных его трансформации в воздухе рабочей зоны на базе оптического абсорбционного метода газового анализа // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2020. № 89. С. 128-134. DOI: 10.22250/jasu.28
10. Ульяновский Н.В. Определение 1,1-диметилгидразина и продуктов его трансформации методами tandemной хроматомасс-спектрометрии. Дис. ... канд. хим. наук. Архангельск, 2015. 148 с.

11. Булгаков А.Б. Оптический газоанализатор: патент РФ № 1494712; опубл. 15.12.1994.

12. Tunable detectors (FPI detectors). <https://www.infratec.eu/sensor-division/fpi-detectors/>

APPLICATION OF GAS ANALYZERS FOR THE CONTROL OF FUEL IN THE AIR ENVIRONMENT OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY ENTERPRISES

© 2021

- A. B. Bulgakov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Life Safety;
Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation;
bgd_2020@mail.ru
- S. P. Vashchuk** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Ecology and Life Safety;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
amurgermovvod@mail.ru
- R. A. Panshin** Postgraduate Student of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
panshinroman2016@yandex.ru

The presented work shows the necessity of organization of individual instrumental control of the content of rocket fuel and its products in the air of rocket-space industry enterprises. No accurate analysis of gas analyzers presented on the Russian market, providing individual instrumental control of concentrations of heptyl and its derivatives in the workplace air is available. Therefore, the task of express, automatic, selective and simultaneous monitoring of heptyl vapors and derivatives of its transformation in the air of industrial premises by one instrument and replacing the imported gas analyzers remains urgent. It is shown that the solution of the posed problem is possible on the basis of the optical absorption method. The requirements to be met by the gas analyzer are formulated. Approximate wavelengths at which simultaneous measurement of concentrations of heptyl and its derivatives in an air sample is possible have been determined. The ways of realization of individual gas analyzers having small mass-size characteristics are outlined. Structural schemes for infra-red gas analyzers have been proposed: multi-channel; single-channel (with frequency modulation of radiation). Tasks for further research are formulated.

Heptyl; derivatives of heptyl transformation; air of the working area; infrared spectrum; optical absorption method of gas analysis

Citation: Bulgakov A.B., Vashchuk S.P., Panshin R.A. Application of gas analyzers for the control of fuel in the air environment of rocket and space industry enterprises. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 110-118. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-110-118

References

1. *O toksichnosti heptila / pod red. L.S. Yaguzhinskogo* [On the toxicity of heptyl / ed. by L.S. Yaguzhinsky]. Moscow: IPCP RAS Publ., 2014. 128 p.
2. Kolesnikov S.V. *Okislenie nesimmetrichnogo dimetilgidrazina (heptila) i identifikatsiya produktov ego prevrashcheniya pri prolivakh* [Oxidation of anisometric dimethyl hydrazine (heptyl) and identification of the products of its transformation in case of spillage]. Novosibirsk: SibAK Publ., 2014. 110 p.
3. Khmeleva M.V. *Ekologicheskie aspekty khimicheskoy aktivnosti nesimmetrichnogo dimetilgidrazina v inertnoy srede, v prisutstvii kisloroda, vody, atmosfernogo vozdukha i pri vozdeystvii elektricheskogo razryada. Dis. ... kand. khim. nauk* [Ecological aspects of

chemical activity of asymmetrical dimethylhydrazine in inert atmosphere, in the presence of oxygen, water, atmospheric air and under the influence of electric discharge: dissertation of candidate of chemical sciences]. Nizhny Novgorod, 2015. 145 p.

4. *Sistema distantsionnogo kontrolya vozduшной среды SDKVS-1M* [СДКВС-1М system of air remote monitoring]. Available at: http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/spec_tehnika/sdkvs_1m/

5. *DART datchik-gazoanalizator komponentov raketного топлива (KRT) stacionarnyy* [DART stationary gas analyzer sensor of rocket fuel]. Available at: <https://www.gazoanalizators.ru/DART.html>

6. Bulgakov A.B., Averyanov V.N. Ways of improving optical absorption gas analyzers for solving tasks in the field of technospheric safety. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Prirodoobustroystvo i Stroitel'stvo: Nauka, Obrazovanie, Praktika» (November, 08, 2017, Blagoveshchensk)*. Blagoveshchensk: DalGAU Publ., 2017. P. 32-38. (In Russ.)

7. Godzhaeva A.R. *Sintez polielektrolita iz epikhlorgidrina i dimetilamina i ego primeneniye pri ochistke stochnykh vod. Dis. ... kand. khim. nauk* [Synthesis of polyelectrolyte from epichlorohydrin and dimethylamine and its application in wastewater treatment: dissertation of candidate of chemical sciences]. Ufa, 2014. 130 p.

8. Nabiev Sh.Sh., Stavrovskii D.B., Palkina L.A., Zbarskii V.L., Yudin N.V., Golubeva E.N., Vaks V.L., Domracheva E.G., Sobakinskaya E.A., Chernyaeva M.B. Spectrochemical features of certain brisant explosives in the vapor state. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2013. V. 26, Iss. 5. P. 377-390. DOI: 10.1134/S1024856013050126

9. Bulgakov A.B., Kornievskaya S.A. Study of the possibility of developing a gas analyzer for the control of heptil and its transformation derivatives in the air of the working zone based on the optical absorption method of gas analysis. *Vestnik Amurskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye i Ekonomicheskie Nauki*. 2020. No. 89. P. 128-134. (In Russ.). DOI: 10.22250/jasu.28

10. Ul'yanovskiy N.V. *Opreделение 1,1-dimetilgidrazina i produktov ego transformatsii metodami tandemnoy khromatomass-spektrometrii. Dis. ... kand. khim. nauk* [Determination of 1,1-dimethylhydrazine and products of its transformation by tandem chromatography-mass spectrometry methods: dissertation of candidate of chemical sciences]. Arkhangelsk, 2015. 148 p.

11. Bulgakov A.B. *Opticheskiy gazoanalizator* [Optical gas analyzer]. Patent RF no. 1494712, 1994. (Publ. 15.12.1994)

12. Tunable detectors (FPI detectors). Available at: <https://www.infratec.eu/sensor-division/fpi-detectors/>