Индикация и идентификация опасных веществ

УДК 54.084:621.389

DOI: 10.25514/CHS.2018.2.14111

КОНТРОЛЬ ДОВЗРЫВООПАСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГАЗОВ И ПАРОВ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

А. А. Михайлов¹*, М. О. Этрекова^{1,2}, А. С. Стороженко¹, Д. Г. Бухаров³, Т. Б. Соколов⁴, Ю. Г. Паршиков⁵

 ¹ООО «Научно-производственная фирма «Инкрам», Москва, *e-mail: mikhailov@inkram.ru
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
⁴ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия
⁵ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.10.2018 г.

Ключевые слова: акустический детектор, детектор горючих газов и паров, довзрывоопасные концентрации.

CHECKING OUT PRE-EXPLOSIVE CONCENTRATIONS OF COMBUSTIBLE GASES AND VAPORS BY MEANS OF ACOUSTIC DETECTOR

A. A. Mikhailov¹*, M. O. Etrekova^{1,2}, A. S. Storozhenko¹, D. G. Bukharov³, T. B. Sokolov⁴, and Yu. G. Parshikov⁵

¹OOO NPF "INKRAM", Moscow, Russia, *e-mail: mikhailov@inkram.ru
²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
³National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia
⁴D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
⁵Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Received October 16, 2018

Abstract – A simple and reliable method for measuring pre-explosive concentrations of flammable gases and vapors using an acoustic detector is proposed. The detector test results are reported for measuring pre-explosive concentrations of a series of vapors of combustible lubricants and special liquids in the air in the range from 0 to 60% of the lower concentration limit of flame propagation. The results indicate that the acoustic detector has a variety of significant advantages over thermal catalytic and infrared detectors, traditionally used to monitor pre-explosive concentrations of hazardous chemicals in the air of industrial fire and explosion hazardous facilities.

Keywords: acoustic gas sensor, combustible gas detector, pre-explosive concentration of flammable gases and vapors.

МИХАЙЛОВ и др.

введение

Акустические методы исследования широко распространены сегодня в науке и технике. В силу развития электроники и благодаря накопленным данным о закономерностях распространения упругих волн в различных средах акустический анализ нашел применение в медицине, биологии, неразрушающем контроле, металлургии, сейсморазведке и многих других сферах жизнедеятельности человека.

конце XIX в. - начале XX b. шахтах В Европе получил В на распространение «метановый свисток» - газоструйный излучатель звука, применяемый для сигнализации об опасности скопления горючих газов [1]. Это был первый простейший акустический детектор взрывоопасных газов, принцип действия которого основан на повышении тона (частоты) производимого звука в присутствии метана или водорода в воздухе за счет увеличения скорости звука.

Современные газоакустические детекторы, как правило, состоят из электроакустического или газоструйного генератора звука, резонатора и акустоэлектрического преобразователя [2]. Исследуемый газ подвергается воздействию звуковой волны в резонаторе или сам служит источником звука за счет направления газовой струи на клиновидное препятствие. При изменении состава воздуха, например, появлении примесей горючих газов, скорость звука закономерно изменяется, что соответственно сказывается на регистрируемой частоте звука и позволяет качественно и количественно (для бинарных газовых смесей) контролировать состав анализируемой атмосферы. Коэффициент пропорциональности между изменением скорости и частоты звука однозначно определяется конструкцией резонатора.

Скорость звука в воздухе (в приближении идеального газа) v_{3B} , м/с, можно рассчитать по формуле [3]:

$$v_{\rm 3B} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}},\tag{1}$$

где $\gamma = C_P/C_V$ – показатель адиабаты; C_P и C_V – соответственно, изобарная и изохорная теплоемкости газа, Дж/(моль·К), причем $C_V = C_P - R$; R – универсальная газовая постоянная 8,31445986 Дж/(моль·К); T – температура газа, К; M – молярная масса газа, кг/моль.

Таким образом, для смеси газов или паров справедливо выражение:

$$\nu_{\rm 3B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \gamma_i \cdot R \cdot T}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i M_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i C_{P_i} \cdot R \cdot T}{(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i C_{P_i} - R) \sum_{i=1}^{n} \alpha_i M_i}},\tag{2}$$

где α_i – доля *i*-го компонента газовой смеси, n – общее количество компонентов. Для случая реальных бинарных газовых смесей можно принять n = 3, подразумевая, что для чистого сухого воздуха i = 1, для паров воды i = 2, для горючего газа или паров i = 3. Теплоемкость газов также зависит от температуры.

В настоящее время существует обширная библиотека экспериментальных и расчетных данных по теплоемкости различных газов. Примеры см. на рис. 1.

140

Рис. 2 иллюстрирует влияние температуры *T*, давления *p* и относительной влажности Φ на скорость звука v_{3B} в воздухе по расчетам, выполненным с использованием справочных данных [4–5] и уравнения (2) при условии $\alpha_3 = 0$.



Рис. 1. Зависимость теплоемкости газов C_P от температуры при давлении 100 кПа: а) чистый сухой воздух [4]; б) водяной пар [5]; в) н-гексан [6].



Рис. 2. а) Зависимость скорости звука v_{3B} в сухом чистом воздухе от температуры *T* при постоянном давлении 100 кПа. б) График изменения скорости звука Δv_{3B} в сухом чистом воздухе, приходящегося на изменение температуры ΔT , в зависимости от давления *p*. в) График изменения Δv_{3B} в чистом воздухе, приходящегося на изменение относительной влажности $\Delta \Phi$, в зависимости от температуры *T* при постоянном давлении 101,3 кПа. г) График изменения Δv_{3B} в чистом воздухе, приходящегося на изменение $\Delta \Phi$, в зависимости от давления *p* при постоянной температуре 25°С.

Анализ данных на рис. 2 приводит к следующим выводам:

1) влияние температуры на скорость звука наиболее существенно и соответствует росту v_{3B} на ≈ 0.6 м/с при повышении *T* на 1°С (рис. 2, а, б);

2) влияние паров воды менее значительно, но зависит от температуры; так, при увеличении относительной влажности воздуха на 5% (p = 101,3 кПа) скорость звука при 25°C увеличится на 0,1 м/с, а при 50°C – на 0,4 м/с (рис. 2, в, г).

3) изменение давления анализируемой среды в широком диапазоне не оказывает существенного влияния на изменение скорости звука, например, изменение давления от 600 до 800 мм. рт. ст. (от 80 до 106 кПа) приведет к изменению скорости звука на 0,005 м/с (рис. 2, б, г).

Итак, скорость звука – хорошо изученная, а, следовательно, предсказуемая физическая величина, зависимость значений которой от состава анализируемой среды (с учетом поправок на изменение ее температуры и влажности), позволяет реализовать метод акустического газового анализа в области измерений объемной доли определяемых компонентов свыше 0,1%.

Основной целью данной работы было комплексное исследование возможностей использования серийно выпускаемого акустического детектора АРП1.0 [7] для контроля довзрывоопасных концентраций паров горючих веществ в воздухе. Согласно [8, 9], довзрывоопасной концентрацией горючего газа (паров) называется концентрация, находящаяся в интервале от нуля до нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Акустический детектор

Основой предлагаемого акустического детектора является полый металлический резонатор цилиндрической формы с технологическими отверстиями для сообщения внутреннего объема с окружающей атмосферой [10]. Внешний вид детектора показан на рис. 3.

В противоположных торцах резонатора встроены излучатель, генерирующий бегущую звуковую волну, и приемник звука, регистрирующий давление звуковой волны. Настройка излучателя на резонансную частоту производится микропроцессором в режиме качающейся частоты. Определение точного значения резонансной частоты производится по максимуму давления волны на приемнике звука. Параметры окружающей звуковой среды регистрируются встроенным датчиком влажности и температуры.



Рис. 3. Внешний вид акустического детектора.

Частота акустического резонанса F_{pes} , Гц, пропорциональна скорости звука v_{3B} , м/с, в исследуемой газовоздушной среде:

$$F_{\rm pe3} = K \cdot v_{\rm _{3B}},\tag{3}$$

где K – коэффициент резонатора, м⁻¹, определяется конструкцией резонатора и является основным параметром при настройке.

Регистрация текущих параметров относительной влажности и температуры анализируемой газовой смеси позволяет вычислять долю водяных паров α_2 , теплоемкость C_P и молярную массу воздуха M для чистого влажного

воздуха. Следовательно, определив значения C_{P3} и M_3 (т. е. выбрав определяемый компонент), можно рассчитать скорость звука как функцию температуры, влажности и содержании детектируемого горючего газа или паров - $v_{3B}(T, \alpha_2, \alpha_3)$.

При этом процедура градуировки АРП, согласно (3), будет заключаться лишь в экспериментальном определении значения коэффициента резонатора K путем подачи на детектор сухого чистого воздуха ($\alpha_2 = \alpha_3 = 0$) и регистрации базового нулевого уровня $F_{\text{рез}_0}$ для текущего значения температуры.

Так, в ходе исследований в рамках данной работы при подаче на АРП нулевого воздуха марки Б при 20°С было получено значение $F_{\text{pes}_0} = (5790 \pm 0.5)$ Гц. Согласно [4], скорость звука в сухом чистом воздухе при 20°С $v_{3B} = (343.29 \pm 0.05)$ м/с, отсюда $K = (16.866 \pm 0.005)$ м⁻¹.

Полезным сигналом первичного измерительного преобразователя АРП является изменение резонансной частоты стоячей волны в резонаторе при появлении в анализируемом воздушном объеме горючего газа или паров с концентрацией α_3 :

 $\Delta F_{\text{pe3}} = F_{\text{pe3}} - F_{\text{pe3}_0}(T, \alpha_2, \alpha_3 = 0) = F_{\text{pe3}} - K \cdot v_{3B_0}(T, \alpha_2, \alpha_3 = 0), \quad (4)$ где F_{pe3} – значение резонансной частоты, регистрируемое при текущих параметрах окружающей среды, $v_{3B_0}(T, \alpha_2, \alpha_3 = 0)$ и $F_{\text{pe3}_0}(T, \alpha_2, \alpha_3 = 0)$ – значения скорости звука и резонансной частоты, рассчитываемые средствами программного обеспечения при текущих параметрах влажности и температуры, но в предположении, что анализируемый объем заполнен чистым воздухом.

Таким образом, согласно (2) и (4) можно экспериментально для каждого конкретного горючего газового компонента (строго – в бинарных газовых смесях) найти градуировочную зависимость $\Delta F_{pe3}(\alpha_3)$, т. е. определить набор статических характеристик детектора по различным смесям горючих газов (паров) с воздухом, при этом влияния температуры и влажности будут скомпенсированы.

Однако, если изначально выбрать определяемый компонент для «номинальной градуировки», т. е. определить в (2) значения γ_3 и M_3 , то программное обеспечение АРП, в соответствии с (2) и (3), позволит в режиме реального времени с учетом параметров окружающей среды решать функцию $F_{pe3} = K \cdot v_{3B}(\alpha_3)$ и рассчитывать выходной сигнал в единицах довзрывоопасной концентрации *C*, % НКПР, горючего газа (паров). Вид выходного сигнала (аналоговый, цифровой) принципиального значения не имеет и определяется исключительно аппаратной реализацией детектора.

Типовая статическая характеристика детектора, например, по токовому выходу сигнала 4...20 мА описывается уравнением

$$I=4+0,32\cdot C,$$

где *I* – значение сигнала токового выхода, мА; *C* – подаваемая концентрация, % НКПР (4 мА соответствует концентрации 0% НКПР, 20 мА – 50% НКПР).

В качестве «номинального» определяемого компонента при проведении исследований был выбран н-гексан.

Итак, в рамках данной работы выходной сигнал детектора - результат преобразования резонансной частоты F_{pes} , Гц, в довзрывоопасную концентрацию *C*, % НКПР, согласно номинальной статической характеристике по н-гексану, рассчитанной на основании уравнений (2) и (4).

Конструкция резонатора и режимы работы электроакустических преобразователей были подобраны таким образом, чтобы диапазон измеряемых концентраций горючих газов и паров в воздухе составлял не менее 0...100% НКПР с пределом обнаружения не хуже 0,02...0,05% об. д. (200...500 ppm).

Необходимо отметить, что акустический детектор не имеет каких-либо ограничений по верхнему пределу довзрывоопасных концентраций, однако в целях соблюдения мер предосторожности большинство экспериментов проводились с газовыми средами, довзрывоопасная концентрация горючего компонента в которых не превышала 60% НКПР.

Экспериментальные проверки показали, что при изменении температуры и влажности окружающей среды в диапазоне от -50° C до $+60^{\circ}$ C и от 0 до 100% (без конденсации) отклонение выходного сигнала АРП от значений, полученных при температуре (20 ± 5)°C и относительной влажности (55 ± 5)% не превышает ± 5 % НКПР.

Таким образом, показано, что, зная только теплоемкость и молярную массу анализируемого вещества, а также условия окружающей среды, можно рассчитать выходной сигнал АРП.

Ha рис. 4 представлены результаты экспериментальной проверки соответствия значения выходного сигнала АРП номинальной статической характеристике (расчетно-теоретической), которая здесь и далее на графиках сплошной линией закономерно является показана биссектрисой И координатной четверти. Данная проверка была выполнена с использованием стандартных образцов н-гексана для хроматографии (ООО «ЦСОВВ», г. Санкт-Петербург) и образцов ч. д. а. (ООО «Компонент-Реактив», г. Москва) на лабораторной установке, описанной ниже.



Рис. 4. Номинальная статическая характеристика (прямая линия - биссектриса) и экспериментальные значения (точки) выходного сигнала АРП при различных

значениях температуры и относительной влажности анализируемой газовой смеси.

На рисунке 4 и далее термин «Дозировано» означает «Довзрывоопасная концентрация анализируемого вещества в ГС (по приготовлению), % НКПР».

Экспериментальная установка

Испытания АРП проводились на экспериментальной установке, принципиальная схема и фотография которой показаны на рис. 5.

Парогазовые смеси с требуемым содержанием горючего компонента создавались в стеклянной бутыли объемом 20 л методом дозирования определенного объема горючей жидкости исследуемого вещества с последующим испарением [11-13]. Для дозирования применялся микрошприц Hamilton 1750 (100...500 мкл).



Рис. 5. Принципиальная схема лабораторной установки для проведения испытаний АРП на довзрывоопасные концентрации паров горючих жидкостей: 1 - камера тепла; 2 - бутыль стеклянная; 3 - вентилятор; 4 - фторопластовые трубки; 5 - микрошприц; 6 - ротаметр; 7 - АРП; 8 - насос.

Для более равномерного перемешивания паров целевых веществ внутри стеклянной бутыли использовался вентилятор.

После испарения горючей жидкости пары полученной газовой смеси с помощью насоса принудительно отбирались на детектор в режиме прокачки по замкнутому циклу газового тракта установки с расходом 2 л/мин.

Для удаления паров исследуемых веществ из газового объема экспериментальной установки выходной патрубок из бутыли переключался на сброс в вытяжной шкаф, а отбор воздуха на детектор осуществлялся из окружающей атмосферы.

МИХАЙЛОВ и др.

Описание экспериментов

В ходе экспериментов были исследованы вещества, перечень и характеристики которых приведены в таблице 1.

Первая серия экспериментов была посвящена исследованию оптимальных режимов работы лабораторной установки. С этой целью для ряда веществ были проведены однотипные эксперименты, отличающиеся лишь температурой Т_{уст} лабораторной установки: 20°С и 60°С. Результаты представлены на рис. б.

Эксперименты показали значительное отклонение экспериментальных значений выходного сигнала АРП от расчетных в зависимости от температуры кипения $T_{\kappa un}$ исследуемых горючих жидкостей. Полученная зависимость выходного сигнала АРП от температуры кипения $T_{\kappa un}$ исследуемых веществ показана на на рис. 6, а Значение выходного сигнала детектора на расчетное содержание паров н-гексана в ГС, равное 25% НКПР при температуре $T_{ycr} = 60^{\circ}$ С, условно было принято за 100%. Эксперименты проводились для расчетного содержания паров исследуемых веществ в ГС, равного 25% НКПР.

N⁰	Вещество		М, г/моль	Ткип, ℃	Соб.д.=100%нкпр,	V _{гж} , мл
п.п.	Наименование	CAS	,	Killi)	% об.д.	TIK)
1	Ацетон СО	67-64-1	58,08	56,5	2,5	1,5
2	Бензол СО	71-43-2	78,11	80,1	1,2	0,9
3	н-Гексан СО	110-54-3	86,18	68,7	1	1,1
4	н-Гексан ч.д.а.					1,1
5	Циклогексан СО	110-82-7	84,16	80,74	1,2	1,1
6	н-Декан ч.д.а.	124-18-5	142,30	174,2	0,7	1,1
7	н-Гептан ч.д.а.	142-82-5	100,21	98,42	1,1	1,3
8	н-Пентан ч.д.а.	109-66-0	72,15	36,1	1,4	1,4
9	н-Нонан ч.д.а.	111-84-2	128,20	151	0,7	1,0
10	Толуол ч.д.а.	108-88-3	92,14	110,6	1,1	1,0
11	Триэтиламин	121-44-8	101,20	≈ 90	1,2	1,4
12	Этанол СО	64-17-5	46,07	78,5	3,1	1,5
13	Метанол СО	67-56-1	32,04	64,7	5,5	1,8
14	Пропанол-1 СО	71-23-8	60,09	97,4	2,2	1,4
15	Пропанол-2 СО	67-63-0	60,09	82,4	2,0	1,3
16	Октан СО	111-65-9	114,23	125,52	0,8	1,1
17	о-Ксилол СО	95-47-6	106,17	144,4	1	1,0

Таблица 1. Перечень и характеристики некоторых исследованных веществ

Обозначения: СО – стандартный образец; М – молярная масса, Т_{кип} – температура кипения горючей жидкости; С_{об.д.=100%НКПР} – объемная доля паров паров вещества, соответствующая 100% НКПР [9]; V_{гж} – объем горючей жидкости (с исходной концентрацией ≈100% вес.), необходимый для создания довзрывоопасной концентрации 100% НКПР в объеме 20 л при нормальных условиях.



Рис. 6. Влияние температуры лабораторной установки T_{ycr} на выходной сигнал АРП в зависимости от T_{kun} горючей жидкости исследуемых веществ (а), на время установления равновесной концентрации в установке (н-гексан) (б).

Далее была поставлена задача сопоставления экспериментальных и номинальных (расчетно-теоретических) статических характеристик детектора для разных веществ. Полученные результаты представлены на рис. 7.



Рис. 7. Сравнение экспериментальных и номинальных (расчетнотеоретических) статических характеристик АРП по соответствующим веществам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным рис. 6 а, отклонение экспериментальной статической характеристики от номинальной увеличивается с увеличением температуры кипения горючей жидкости анализируемого вещества. Данный факт объясняется конденсацией паров на внутренней поверхности установки. Также можно заметить, что для веществ с Т_{кип} ≤ 120°C отклонение экспериментальной статической характеристики от номинальной минимально.

Исходя из указанного выше, было принято решение при работе с веществами, температура кипения которых не более 100°С, проводить исследования в режиме работы стенда с $T_{vcr} = 18...25$ °С, а в случаях с

 $T_{\text{кип}} \ge 100^{\circ}\text{C}$ – термостатировать установку при 60°C в камере тепла. Стоит учесть, что даже при $T_{\text{уст}} = 60^{\circ}\text{C}$ в испытаниях с веществами, для которых $T_{\text{кип}} > 140^{\circ}\text{C}$ (н-декан, ксилол, н-нонан), фактическое содержание паров в ГС, вероятно, было ниже расчетного за счет частичной конденсации паров.

Подобное предположение подтверждается анализом данных, представленных на рис. 7. Пунктирные линии – номинальные статические характеристики АРП для исследуемых веществ, сплошные линии – номинальная статическая характеристика по н-гексану. Как видно, отклонение экспериментальных статических характеристик от номинальных не превышает 5% НКПР в случаях, когда выполняется неравенство T_{кип} – T_{vcr} ≤ 50°C.

Таким образом, в ходе исследований было установлено соответствие экспериментальных и номинальных (расчетно-теоретических) характеристик АРП при условии, что температура кипения анализируемых веществ не превосходит температуру установки более чем на 50°С (T_{кип} – T_{уст} < 50°С).

Результаты комплексного исследования статических характеристик АРП на пары веществ представлены на рис. 8.

Как видно, выходной сигнал АРП для подавляющего большинства исследованных веществ хорошо коррелирует с номинальной статической характеристикой по н-гексану. Отклонение выходного сигнала в среднем не превышает $\pm 10\%$ НКПР и определяется, главным образом, физическими свойствами веществ.



Рис. 8. Сводные экспериментальные данные по испытанию АРП: а) и б) результаты, полученные на экспериментальной установке, описанной в данной работе; в) результаты по топливам, полученные на рабочем эталоне 1го разряда - комплексе ГГП-1 (ФИФ 48775-11, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»).

В процессе исследований дрейф нулевых показаний после проведения измерений не превышал ±1% НКПР. Это, на наш взгляд, свидетельствует об

отсутствии влияния конденсации паров горючих веществ на элементах детектора на его работу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время для контроля довзрывоопасных концентраций горючих газов и паров преимущественно используются термокаталитические (ТК) сенсоры, главное достоинство которых – низкая стоимость. Кроме того, все более широкое применение находят инфракрасные (ИК) детекторы, однако их распространение ограничено более высокой стоимостью.

В работе показано, что с помощью акустического детектора можно реализовать простой, недорогой и надежный способ измерения довзрывоопасных концентраций горючих газов и паров, имеющий по сравнению с традиционно используемыми ТК и ИК-детекторами ряд существенных преимуществ:

1) обширная номенклатура определяемых взрывоопасных газов и паров с малым разбросом чувствительности, что позволяет создать универсальный детектор (газосигнализатор) горючих газов и паров;

2) соотношение чувствительности для различных газов и паров имеет постоянное значение во всем диапазоне измерений, что является значительным преимуществом акустического детектора по сравнению с ИК детекторами;

3) широкий диапазон измерения довзрывоопасных концентраций;

4) линейная статическая характеристика с возможностью построения ее расчетными методами для всех горючих газов и паров, по крайней мере, в диапазоне 0...100% НКПР;

5) независимость показаний от давления, температуры и влажности, благодаря как физическому принципу измерений, так и компенсации, реализованной средствами программного обеспечения;

6) простая процедура градуировки.

Список литературы:

- 1. Garrett S.L. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2008. V. 123 (5). P. 3372.
- 2. Zipser L., Wachter F., Franke H. // Sensors and Actuators B. 2000. V. 68. P. 162.
- 3. Акустика: Справочник. Под ред. М.А. Сапожкова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 336 с.
- 4. *Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А.* Термодинамические свойства воздуха. ГСССД. Серия монографии. М.: Изд. стандартов, 1978. 276 с.
- 5. http://webbook.nist.gov/chemistry/ (дата обращения 08.09.2018).
- 6. https://www.chemeo.com/cid/68-275-2/Ethylenediamine#ref-joback (дата обращения 08.09.2018).
- 7. Свидетельство № 52098 об утверждении типа средств измерений. Преобразователи измерительные акусторезонансные АРП 1.0.
- 8. ГОСТ Р 56520-2015. Железнодорожный подвижной состав. Методы определения взрывоопасных концентраций газов в аккумуляторных ящиках.
- 9. ГОСТ Р 51330.19-99 (МЭК 60079-20-96) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования.
- 10. Патент на полезную модель 57467 РФ, 2006.

МИХАЙЛОВ и др.

- 11. Коллеров Д.К. Метрологические основы газоаналитических измерений. (Теория и практика получения градуировочных и поверочных газов и газовых смесей). М.: Изд. стандартов, 1967. 395 с.
- 12. ГОСТ Р ИСО 6144-2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Статический объемный метод.
- 13. Установка для приготовления парогазовых смесей УГС-2. Технические условия ИБЯЛ.413229.001 ТУ. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. 42 с.

References:

- 1. Garrett S.L. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2008. V. 123 (5). P. 3372.
- 2. Zipser L., Wachter F., Franke H. // Sensors and Actuators B. 2000. V. 68. P. 162.
- 3. Acoustics: A Handbook. Ed. by M.A. Sapozhkov. 2nd ed. M.: Radio and svayz', 1989. 336 p.[in Russian].
- 4. *Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. et al.* Thermodynamic properties of air. GSSSD. A series of monographs. M.: Izd. Standartov, 1978. 276 p. [in Russian].
- 5. http://webbook.nist.gov/chemistry/ (accessed 09.08.2018) [in Russian].
- 6. https://www.chemeo.com/cid/68-275-2/Ethylenediamine#ref-joback (accessed 09.08.2018).
- 7. Certificate No. 52098 on the type approval of measuring instruments. Acoustic-resonance measuring transducers ARP 1.0.
- 8. GOST [State Standard] R 56520-2015. Railway rolling stock. Methods for the determination of explosive gas concentrations in battery boxes [in Russian].
- 9. GOST [State Standard] R 51330.19-99 (IEC 60079-20-96) Explosion-proof electrical equipment. Part 20. Data on combustible gases and vapors related to the operation of electrical equipment [in Russian].
- 10. Utility model patent 57467, Russian Federation, 2006 [in Russian].
- 11. *Kollerov D.K.* Metrological basis of gas analytical measurements. (Theory and practice of obtaining calibration gases and gas mixtures). M .: Izd. standards, 1967. 395 p. [in Russian].
- 12. GOST [State Standard] R ISO 6144-2008. Gas analysis. Preparation of calibration gas mixtures. Static volumetric method [in Russian].
- 13. Installation for preparation of steam-gas mixtures UGS-2. Standard specification IBAYL.413229.001 TU. FSUE VNIIFTRI, 2015. 42 p. [in Russian].