



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2019–5

В.Н. Алферов, Д.А. Васильев

## **Акустический газоанализатор**

Направлено в *«Акустический  
журнал»*

Протвино 2019

**Аннотация**

Алферов В.Н., Васильев Д.А. Акустический газоанализатор: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019–5. – Протвино, 2019. – 11 с., 5 рис., библиогр.: 13.

Рассмотрены способы измерения состава бинарной или квазибинарной газовой смеси с использованием зависимости скорости звука в газе от его молекулярного веса, в частности, с помощью акустического резонатора. Описан разработанный на этом принципе анализатор присутствия водорода в атмосфере мишенной станции, разработанной НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов

**Abstract**

Alferov V.N., Vasiliev D.A. Acoustical Gas Analyzer: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019–5. – Protvino, 2019. – p. 11, figs.5, refs.: 13.

The possibility of determination of composition of binary or quasi-binary gas mixtures using dependence of the sound speed on molecular weight, in particular with the acoustic resonator is considered. The detector of the presence of Hydrogen in the atmosphere based on this idea has been designed and is described below. The detector is aimed to detect an appearance of gas at the target station developed by the National Research Center «Kurchatov Institute» – IHEP for a cyclotron of the S-70 accelerator producing medical isotopes.

## 1. Введение

Акустические анализаторы предназначены, как правило, для определения примеси к основному газу. Действие акустических анализаторов основано на использовании зависимости скорости звука от молекулярного веса газа. Скорость звука ( $v$ ) рассчитывается по следующей формуле

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты ( $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ );

$C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении;

$C_v = C_p - R$  – теплоемкость газа при постоянном объеме;

$M$  – молекулярная масса газа;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура газа (К).

Такой метод удобен при детектировании примесного газа к основному, например чистому сухому воздуху. Если мы знаем молекулярный вес основного и примесного газов, то скорость звука в основном газе в присутствии примесного в первом приближении может быть представлена, как:

$$C_x = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\chi M_{\text{пр}} + (1-\chi) M_{\text{осн}}}},$$

где  $\chi$  – относительная концентрация примеси.

## 2. Конструкции однопримесных анализаторов

В первых акустических газоанализаторах скорость звука измерялась времяпролетным способом, например, описанным в [1]. Такое устройство имеет низкую точность измерения времени прохождения зондирующего импульса (единицы процентов), повысить которую можно только за счет увеличения габаритов устройства.

Применение акустического резонатора позволяет повысить точность измерения.

Наибольшую точность обеспечивают сферические резонаторы [2] за счет очень высокой добротности (2000 – 10000). Они позволяют довести точность измерения до  $10^{-6}$ .

Сложность изготовления сферы побудило использовать цилиндрический резонатор. Такой прибор описан в [3]. Камера резонатора в нем выполняется в виде отрезка трубы, ограниченной мембранами, либо в виде сосуда специальной формы, например в виде резонатора Гельмгольца. Исследуемый газ подается специальным проточным устройством. Измеряемой величиной является резонансная частота. Такие газоанализаторы также имеют невысокую точность измерения, обусловленную низкой добротностью резонатора из-за связи его с проточным устройством, влияния температуры, мембран и дисперсией фронта звуковой волны. Кроме того, газоанализатор на базе резонатора Гельмгольца не позволяет вести непрерывное измерение концентрации газа.

В [4] описан блок из двух цилиндрических резонаторов в едином алюминиевом корпусе для определения состава бинарной смеси  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ , термостабилизированный в водяной ванне. Второй резонатор, заполненный  $^4\text{He}$ , использовался в качестве опорного для компенсации изменений температуры окружающей среды. Измерялась резонансная частота, достигнута точность не хуже  $10^{-3}$ .

Обеспечить периодические измерения позволяет прокачка газа через резонатор. Такой прибор разработан и используется в FNAL для контроля утечек гелия в криогенной системе, обеспечивающей жидким гелием сверхпроводящие магниты Теватрона [5]. В нем также используются два резонатора в общем корпусе: измерительный и опорный. Через измерительный прокачивается исследуемый воздух, через опорный – воздух из части помещения, где не ожидается присутствие гелия.

Резонаторы включены в цепь обратной связи автогенераторов, измеряется разность фаз сигналов микрофонов. Резонаторы термостабилизируются нагревателем.

Нашей целью было разработать анализатор присутствия водорода в атмосфере мишенной станции, разработанной НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов [7]. Водород может появиться при разгерметизации мишени. Поэтому анализатор должен обеспечивать непрерывные измерения и иметь высокую чувствительность, чтобы зафиксировать раннюю стадию развития аварии. Применение акустического резонатора позволяет решить эту задачу. Кроме этого, резонатор в качестве сенсора обладает двумя важными достоинствами: неизменностью во времени чувствительностью и стабильностью «нуля», то есть, частоты при данной температуре в «нулевом» (без примеси) газе. Прежде всего, было желательно избавиться от прокачки газа при сохранении хорошей добротности. Нами предложен и запатентован полуволновой резонатор с диаметром немного меньшим длины и добротностью около 300 на воздухе и диффузионным заполнением [6]. Схематически он приведен на рис. 1. В варианте анализатора присутствия известного газа в воздухе помещения он имеет отверстия 2 для диффузионного заполнения в середине высоты, в минимуме давления и пучности скорости. На торцах резонатора установлены излучатель 3 и микрофон 4, которые сообщаются с полостью резонатора через отверстия 5 диаметром около 3 мм.

Прибор на таком принципе ранее уже был разработан ГНЦ ИФВЭ по заказу ОАО ГАЗПРОМ и описан в [8]. В нем использовался опорный резонатор с чистым сухим воздухом. Опыт показал недостатки этого метода: недостаточную стабильность состава в металлическом запаянном сосуде в долговременном плане, разное поведение в диапазоне температур, погрешности, вносимые им в измерения, сложность изготовления.

В анализаторе водорода применена предварительная калибровка резонатора в атмосфере чистого сухого воздуха в диапазоне требуемых температур. Его описание приведено ниже.

### 3. Датчик водорода

#### 3.1. Конструкция

На торцах резонатора (рис. 1) установлены электродинамический излучатель (НСО 905F) и электретный микрофон (НМО 1003А), которые сообщаются с полостью резонатора через отверстия диаметром около 1 мм.

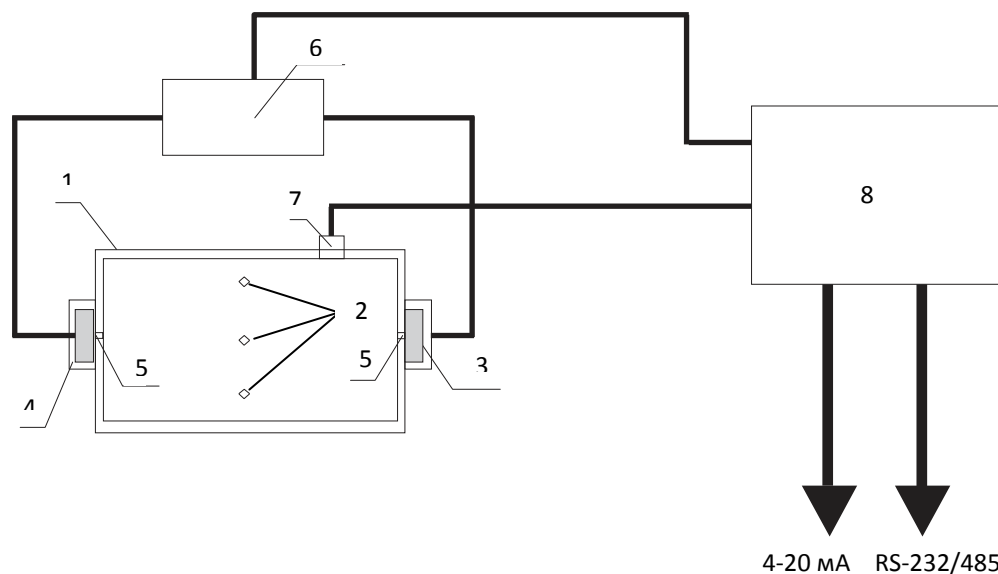


Рис. 1. Блок-схема акустического анализатора. 1 – корпус резонатора, 2 – отверстия для конвекции, 3 -электродинамический излучатель, 4- электретный микрофон, 5 - отверстия диаметром около 1 мм, 6 – автогенератор, 7 – датчики температуры и влажности, 8 – контроллер.

Излучатель НСО 905F имеет относительно плоскую частотную характеристику в диапазоне 5 кГц, эта частота была выбрана рабочей, что определило длину полуволнового резонатора - 30 мм.

Излучатель и микрофон включены в цепь обратной связи автогенератора на микросхеме 1561ГГ1. Автогенератор возбуждается на частоте около 5 кГц в атмосфере чистого сухого воздуха, частота измеряется ежесекундно в течение 0,1 секунды в блоке измерения и управления ПЛИС Altera EPM 7128 с помощью кварцевого генератора, счетная частота 1 МГц, и передается в контроллер на базе микросхемы ADuC 834. Частота кварцевого генератора регулярно проверяется подачей на измерительный канал опорной частоты известной величины, реализованной на микросхеме двоичного счетчика с кварцевым резонатором; корректный результат является признаком исправности ПЛИС и контроллера.

В качестве датчика температуры используется встроенный датчик в составе датчика влажности (см. ниже). В качестве контрольного датчика температуры используется высокостабильный резистор с малым ТКС. Это сделано с учетом критической важности точности и надежности измерений температуры. Датчики запитаны от двух отдельных бортовых источников тока 200 мкА. Контролируется стабильность значения температуры контрольного датчика.

Контроллер имеет интерфейсы 4-20 мА, RS-232 и RS-485 для связи с ЭВМ. При превышении регулируемых порогов генерируются релейные предупредительный и аварийный сигналы.

В стабильных условиях по температуре и составу газа нестабильность показаний частоты не превышает  $10^{-5}$ . Такая стабильность позволила измерить содержание неона ( $\mu=20,2$ ) в гелии ( $\mu=4$ ) с погрешностью  $1 \times 10^{-5}$ . Этот параметр важен в установках ожижения гелия, так как твердый неон забивает арматуру. При этом использовался резонатор с одним входным отверстием, он последовательно заполнялся исследуемым и заведомо чистым гелием.

### **3.2. Внешние факторы и особенности конструкции**

На характеристики прибора влияют как внешние факторы, так и особенности конструкции. Кратко рассмотрим их.

***Зависимость частоты резонатора от температуры*** снимается в термокамере в атмосфере чистого сухого воздуха и записывается в энергонезависимой флэш-памяти прибора.

***Зависимость частоты резонатора от давления.*** Согласно [9], зависимость скорости звука в воздухе от давления составляет примерно  $2 \cdot 10^{-3}$  атм/м/сек, по данным [10]  $5 \cdot 10^{-4}$  атм/м/сек; а для водорода - примерно  $2 \cdot 10^{-3}$  атм/м/сек, то есть, обычные колебания атмосферного давления на точность измерений заметно не влияют.

***Зависимость частоты резонатора от влажности.*** Так как атмосфера помещений характеризуется переменной влажностью, влияющей на скорость звука [11], производится компенсация влажности. Для этого на внутренней стенке резонатора смонтирован датчик относительной влажности ННН-4602А фирмы Honeywell. Экспериментально измерялось изменение частоты резонатора от относительной влажности при различных температурах. В энергонезависимой флэш-памяти прибора сохраняется

трехмерная таблица при 14 значениях температуры от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $60^{\circ}\text{C}$ . По данным измерений с использованием интерполяционного многочлена 4-го порядка определялась поправка на влажность.

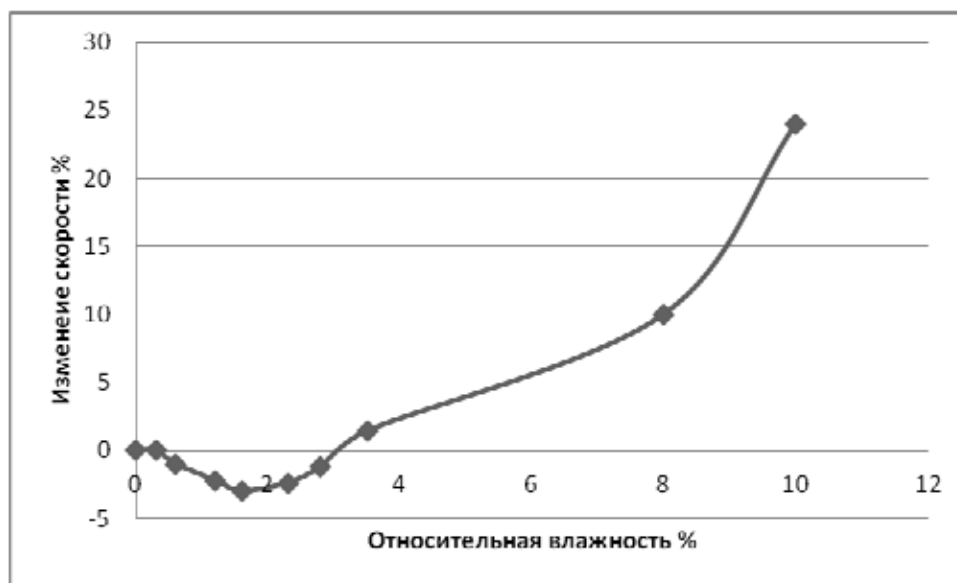


Рис. 2. Изменение скорости звука в зависимости от относительной влажности воздуха при температуре  $60^{\circ}\text{C}$ .

Интересно влияние влажности на скорость звука. Во-первых, зависимость скорости от относительной влажности нелинейна, во-вторых, не при всех температурах она монотонна на частотах около 5кГц. Если до температуры  $50^{\circ}\text{C}$  она монотонна, то уже при  $60^{\circ}\text{C}$  монотонности нет. На рис. 2 приведена измеренная зависимость скорости звука от относительной влажности при температуре  $60^{\circ}\text{C}$ . Видно, что при малых значениях влажность слегка уменьшает скорость звука, и только, начиная с величины около 5%, идет линейный рост добавки скорости. Интересно сравнить эти данные с данными, взятыми из источника [12], для частоты звука 10 кГц (рис. 3). Здесь не приведены данные для небольших значений относительной влажности, а эффект уменьшения скорости виден в диапазоне влажности (40-50)%.



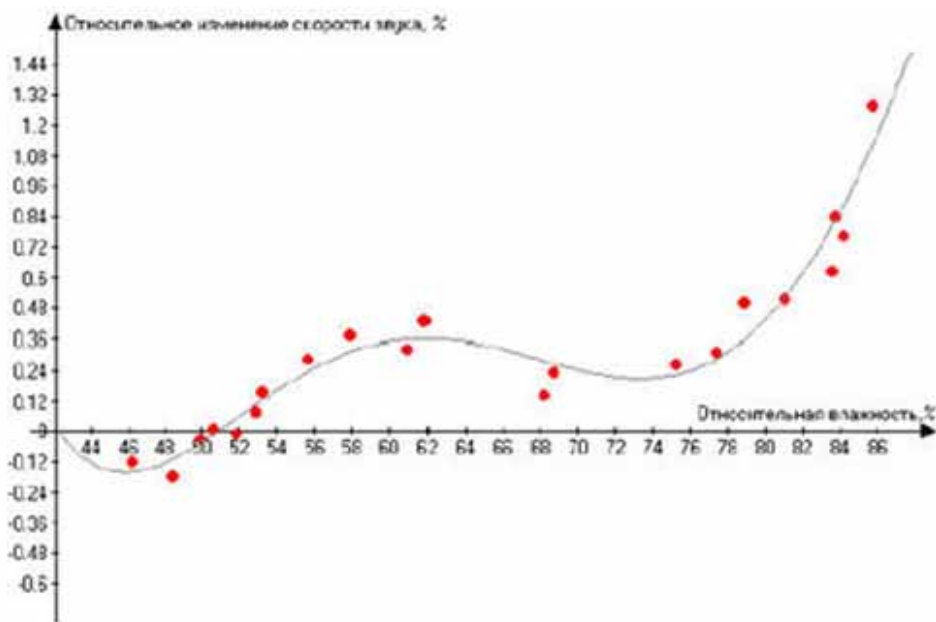


Рис. 3. Зависимость относительного изменения скорости звука от влажности при температуре 25<sup>0</sup>С.

**Отверстия для конвекционного проникновения газа.** Количество и суммарная площадь конвекционных отверстий влияет на результат измерений двояким образом. С одной стороны, увеличение площади обеспечивает скорейшее заполнение резонатора испытуемым газом. Время появления выходного сигнала (90%) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52139-2003 (МЭК 61779-4-98) [13] не должно превышать 20 с. Это условие выполняется при наличии не менее 4 отверстий диаметром 3 мм. При наличии 7 отверстий это время уменьшается до 10 с.

С другой стороны, через отверстия происходит проникновение сторонних шумов в полость резонатора. Особенно опасно возбуждение полости как резонатора Гельмгольца. Частота этих колебаний ниже резонансной частоты резонатора, но увеличение площади отверстий сближает эти частоты. Так при наличии 10 отверстий диаметром 3 мм резонанс наступает на частоте 1,2 кГц, при 7 отверстиях того же диаметра – на частоте 0,8 кГц. При этом звуковой сигнал мощностью (90 - 95) дБ возбуждает колебания в микрофоне, сравнимые по амплитуде с рабочими (80 – 120) мВ. Вариант с 7 отверстиями и был принят в качестве рабочего. Активный фильтр верхних частот 4-го порядка в усилительном тракте после микрофона с частотой среза около 4 кГц

подавляет резонансы от внешних шумов низких частот в режиме резонатора Гельмгольца и препятствует возбуждению резонансов низких частот, особенно около 3 кГц, вызванных неравномерностью АЧХ излучателя.

Внешний вид прибора приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид газоанализатора.

#### **4. Испытания и Характеристики**

Прибор испытывался на термостойкость, чувствительность к шумам, вибрации, а также на долговечность.

О долговечности свидетельствует тот факт, что резонаторы, изготовленные в 2003 – 2010 годах, до сих пор работоспособны и сохраняют «ноль», как периодически включаемые, так и неиспользованные.

Флуктуации частоты в стабильных условиях составляют примерно  $\pm 0,02$  Гц. В реальных условиях помещения они определяются флуктуациями температуры и влажности. Суммарная нестабильность частоты составляет  $\pm 0,2$  Гц. Вклад во флуктуации «нуля» загазованности вносят, кроме того, неточность зависимости частоты от температуры в сухом воздухе, неточность трехмерной таблицы зависимости сдвига

частоты от показаний датчика влажности и температуры. Суммарная нестабильность «нуля» загазованности по водороду составляет  $\pm 0,5$  Гц.

Для определения чувствительности и линейности датчик калибровался тремя поверочными газовыми смесями воздуха с водородом 0,5% (допустимое отклонение 0,04%), 1% и 2% объемных (допустимое отклонение 0,1%), а также в нулевой точке сухим воздухом. На рис. 5 приведены результаты, видна достаточная линейность. Измеренная чувствительность по водороду составляет 20 Гц/%, погрешность калибровки определяется, в основном, погрешностью состава поверочных газов и составляет  $\pm 0,1\%$ . Таким образом, с учетом собственной погрешности «нуля»  $\pm 0,025\%$ , общая погрешность измерения загазованности атмосферы водородом с калибровкой данными смесями может быть оценена в  $\pm 0,12\%$ . Она при необходимости может быть уменьшена на порядок с помощью более точных приборов и поверочных газов.

Потребляемая мощность от сети 220 В-1,5 Вт.

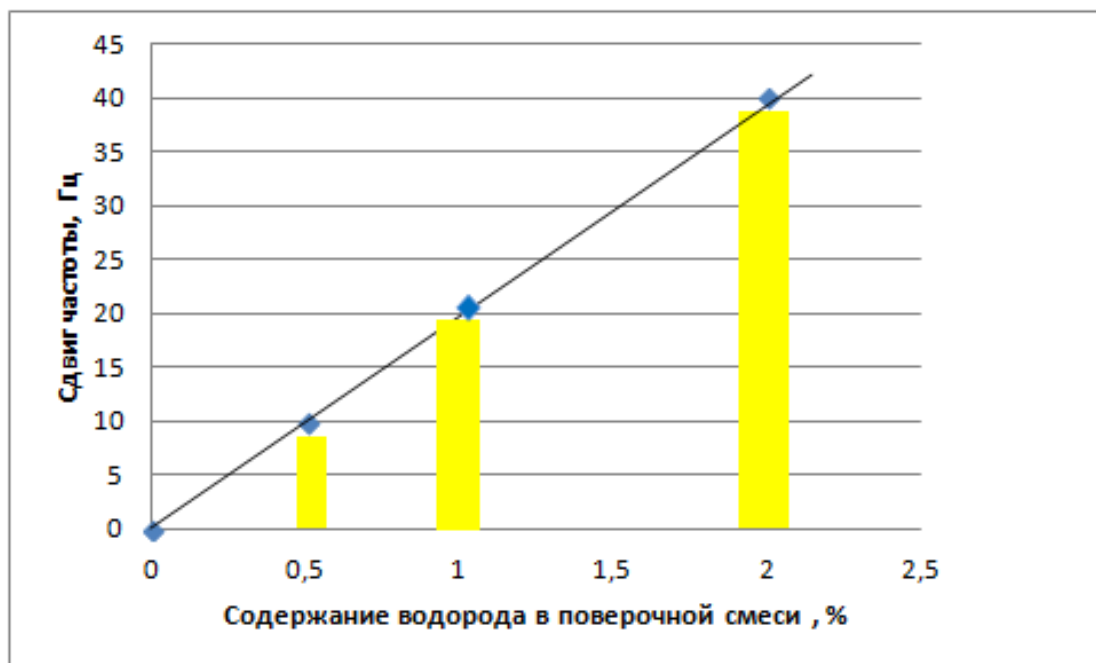


Рис. 5. Зависимость сдвига частоты резонатора от содержания водорода в поверочной смеси. Цветом показана область погрешности состава смеси.

## Заключение

Показано, что полуволновой акустический резонатор с добротностью 200-300 и диффузионным заполнением позволяет измерять примесь газа к основному на уровне  $10^{-5}$ .

Разработан и изготовлен акустический датчик водорода для мишенной станции, разработанной НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов. Датчик обеспечивает непрерывный режим измерений и не нуждается в периодической поверке.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии «27» июня 2019 г. № 075.15.2019.1393, идентификатор Соглашения RFMEFI60717X0193.

## Список литературы

- [1] Авторское свидетельство № 853520, МКИ G 01N29/00, 1981.
- [2] R. Keolian, S. Garrett, J. Naynard, and I. Rudnick, J. Acoust.Soc. Am. 64, S61 (1978).
- [3] Авторское свидетельство № 832447, МКИ G01 № 29/00, 1981.
- [4] E. Polturak, S.L. Garrett, and S.G. Lipson, Rev. Sci. Instrum. 57 (11), November 1986.
- [5] R.G. Bossert, Fermilab-Conf-05-642-AD.
- [6] Патент RU 2142131 C1, МПК G01№ 29/00, 1999.
- [7] E.N. Savitskaya<sup>†</sup>, M.A. Maslov, S.A. Nikitin, V.N. Peleshko, N.V. Skvorodnev. Selection of materials for target station equipment at cyclotron cyclon-70. RUPAC-2018; URL: [RUPAC-2018](#) , WEPSB54, p. 391.
- [8] В.Н. Алферов, Д.А. Васильев. Акустический анализатор состава двухкомпонентной газовой смеси и датчик загазованности атмосферы производственных помещений. Химическая промышленность, 1, 2007, стр. 54.
- [9] Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976.
- [10] Физический справочник <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/>
- [11] Harris C.M. Effect of Humidity J. Acoust. Soc. Am. V.49.N3.1971.

- [12] <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/215.pdf>. Влияние влажности на скорость звука в воздухе. Бабинцев В.А., Виноградов Е.А., Шипилов К.Ф. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волновых исследований, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.
- [13] ГОСТ Р 52139-2003 (МЭК 61779-4-98) Газоанализаторы и сигнализаторы горючих газов и паров электрические Часть 4 «Требования к приборам группы II с верхним пределом измерений содержания горючих газов до 100% нижнего концентрационного предела распространения пламени».

*Рукопись поступила 15 августа 2019 г.*

В.Н. Алферов, Д.А. Васильев

Акустический газоанализатор.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати	19.08.2019.	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1.	Уч.– изд.л. 1,24.	Тираж 80.	Заказ 6.	Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2019-5,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019

---