

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 533

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР  
ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

©2025 г. В. Н. Алферов<sup>a,\*</sup>, Д. А. Васильев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра  
“Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино, Московская обл., пл. Науки, 1

\* e-mail: Vladimir.Alferov@ihep.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Описан датчик анализа состава бинарной газовой смеси с помощью акустического резонатора на основании зависимости скорости звука в газе от его молекулярной массы. Для анализа состава смеси необходимо иметь в распоряжении один из газов в чистом виде. В этом случае погрешность измерения не хуже  $10^{-4}$ . В качестве референсной также можно использовать смесь с известным составом.

DOI: 10.31857/S0032816225010181, EDN: GHVRWJ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Акустические анализаторы предназначены, как правило, для определения концентрации примеси в основном газе. Действие акустических анализаторов основано на использовании зависимости скорости звука от молекулярной массы газа. Скорость звука  $v$  рассчитывается по следующей формуле:

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

где  $\gamma$  – показатель адиабаты ( $\gamma = C_p/C_v$ ),  $C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении,  $C_v = C_p - R$  – теплоемкость газа при постоянном объеме,  $M$  – молекулярная масса газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  [К] – температура газа.

При детектировании небольших количеств примесного газа к основному можно пользоваться упрощенным способом расчета. Если мы знаем молекулярную массу основного и примесного газов, то скорость звука в основном газе в присутствии примесного в первом приближении может быть представлена следующей формулой:

$$C_\chi = \sqrt{\frac{RT}{\chi \left( \frac{M}{\gamma} \right)_{\text{пр}} + (1-\chi) \left( \frac{M}{\gamma} \right)_{\text{осн}}}},$$

где  $\chi$  – относительная концентрация примеси.

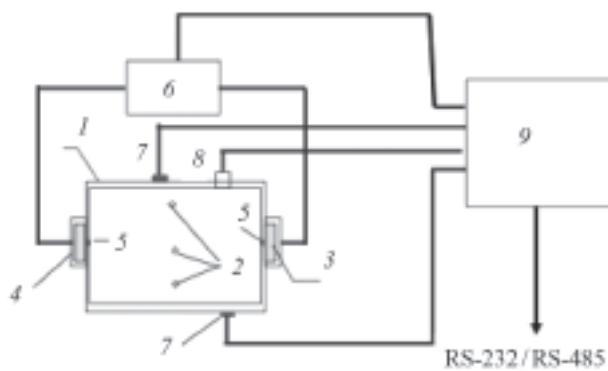
В анализаторе, основанном на акустическом резонаторе, частота резонанса пропорциональна скорости звука, появление примеси вызывает измеряемое отклонение частоты.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ АНАЛИЗАТОРА

Конструкция анализатора в основном повторяет устройство ранее разработанного датчика наличия водорода в атмосфере мишленной станции, разработанной ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов [1]. В ее основе лежит запатентованный полуволновой резонатор с диаметром, немного меньшим его длины, добротностью около 300 на воздухе и диффузионным заполнением [2]. Схематически анализатор приведен на рис. 1.

Для диффузионного заполнения в середине высоты в пучности скорости имеются отверстия 2 диаметром около 3 мм. На торцах резонатора установлены излучатель 3 и микрофон 4, которые сообщаются с полостью резонатора через отверстия 5 диаметром около 2 мм.

Излучатель и микрофон включены в цепь обратной связи автогенератора 6, реализованного на микросхеме ГУН 1561ГГ1. Температура контролируется двумя платиновыми датчи-



**Рис. 1.** Блок-схема акустического анализатора: 1 – корпус резонатора, 2 – отверстия для конвекции, 3 – электродинамический излучатель, 4 – электретный микрофон, 5 – отверстия для излучателя и микрофона, 6 – автогенератор, 7 – основной и контрольный датчики температуры, 8 – датчик влажности, 9 – контроллер.

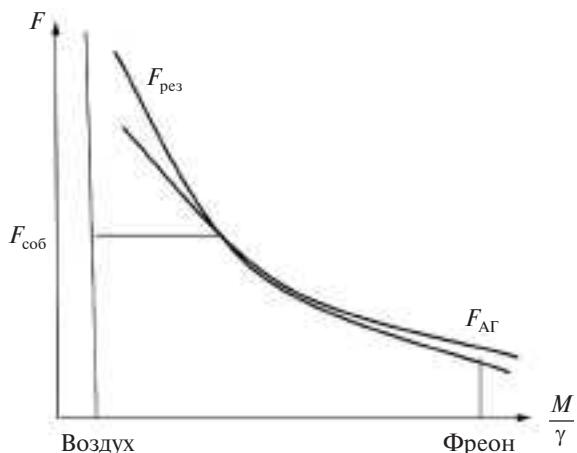
ками 7. Автогенератор возбуждается на частоте около 5 кГц в атмосфере чистого сухого воздуха, частота измеряется один раз в секунду течение 0.1 с в блоке измерения и управления 9. Частота измерительного кварцевого генератора регулярно проверяется подачей на измерительный канал опорной частоты известной величины, реализованной на микросхеме двоичного счетчика с кварцевым резонатором; корректный результат является признаком исправности электроники.

В стабильных условиях по температуре и составу газа нестабильность показаний частоты резонанса не превышает  $10^{-5}$ .

Из приведенной формулы для скорости звука в газе следует: если мы знаем измеренную резонансную частоту одного из двух чистых газов с известной молекулярной массой и постоянной адиабаты при известной температуре, то можем вычислить резонансную частоту любой смеси этих газов при любой температуре.

При измерениях в газах с небольшой долей примесей (единицы процентов) не имеет большого значения точность настройки частоты автогенератора на частоту резонанса; относительное содержание примеси равно удвоенному относительному изменению частоты автогенератора по отношению к частоте в атмосфере чистого основного газа. В остальных случаях для определения доли примеси необходимо знать молекулярную массу и постоянную адиабаты смеси газов, характеризуемую резонансной частотой резонатора, которая также зависит и от температуры.

Проблема измерения резонансной частоты состоит в том, что измеряемая частота автогенератора на примененной в анализаторе микросхеме 1561ГГ1 совпадает с резонансной частотой резонатора, только если это собственная частота автогенератора. Для более тяжелого газа (с учетом постоянной адиабаты) она выше, а для более легкого – ниже резонансной частоты. Это проиллюстрировано на рис. 2 для смеси воздуха с фреоном 22.



**Рис. 2.** Резонансная частота резонатора  $F_{\text{рез}}$  и частота автогенератора  $F_{\text{АГ}}$ .

Таким образом, для расчета молекулярной массы смеси газов необходима трехмерная картина зависимостей резонансной частоты резонатора от частоты автогенератора при разных температурах. Температурные зависимости снижаются в климатической камере с подачей газа снаружи. Резонансная частота определяется по максимуму сигнала с резонатора при возбуждении его от стороннего генератора и контроле электроникой прибора. Второй способ определения резонансной частоты состоит в настройке собственной частоты автогенератора таким образом, чтобы частота не менялась при подключении резонатора. Погрешность настройки обоими методами можно оценить в  $\pm 1$  Гц.

Аппроксимация данных облегчается следующими обстоятельствами. Из формулы для скорости звука в газе и, соответственно, резонансной частоты резонатора следует, что для любой молекулярной массы газа произведение  $F_{\text{рез}} \sqrt{M/\gamma}$ , не зависит от молекулярного веса, оно зависит только от температуры (рис. 3). Точно так же частное от деления резонансной частоты на квадратный корень из абсолютной температуры  $F_{\text{рез}}/\sqrt{T}$  не зависит от температуры. С учетом

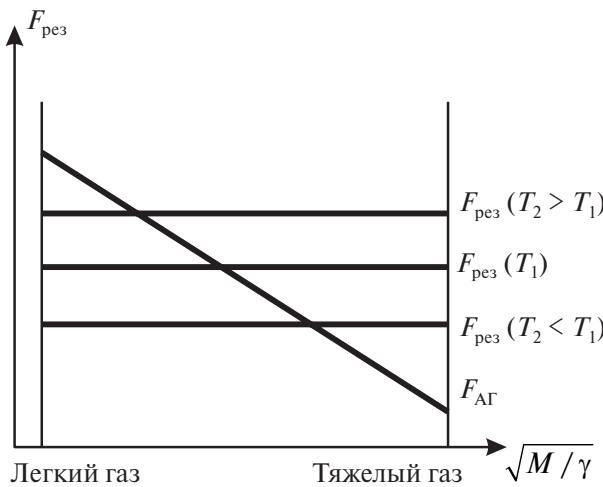


Рис. 3. Зависимости резонансной частоты от  $\sqrt{M/\gamma}$  при разных температурах.

этого погрешность определения резонансной частоты можно снизить до долей Гц, и, соответственно, погрешность определения молекулярной массы уменьшится до сотых долей процента.

Фазовый диапазон захвата ФАПЧ микросхемы 1561ГГ1 составляет  $\pm 90^\circ$  между выходным и входным сигналами. Поэтому собственную частоту автогенератора целесообразно выбирать посередине между резонансными частотами чистых газов, как это и показано на рис. 2.

Важно использовать излучатель с низкой индуктивностью катушки возбуждения, например излучатель наушников-вкладышей, так как именно индуктивность ограничивает частотный диапазон автогенератора. Такая конфигурация прибора позволила измерять молекулярную массу смеси от фреона 22 ( $M = 86.4$ ) до 50-процентной смеси воздуха с гелием. Результирующая погрешность измерения составила 0.025%.

Прибор связывается с компьютером по линиям RS-232 или RS-485. Внешний вид (такой же, как и у датчика водорода из работы [1]) приведен на рис. 4.

Сравним описываемый прибор с датчиками, анализирующими различные газовые смеси, основанными на других физических принципах.

Среди самых точных методов определения состава газовой смеси наиболее распространены хроматография и спектроскопия. Так, газовый хроматограф РД 34.46.303-98 [3] обеспечивает предел обнаружения определяемых в масле газов не выше 0.00005% для ацетилена и 0.0001% для метана, этилена и этана.

Фурье-спектрометры в ИК-диапазоне [3] также могут эффективно использоваться для



Рис. 4. Внешний вид газоанализатора.

многокомпонентного газового анализа. Чувствительность для ацетилена достигает 0.00005%. Но ИК-метод не позволяет детектировать инертные и двухатомные газы, такие как  $O_2$  и  $N_2$ , молекулы которых состоят из одинаковых атомов.

Кроме того, приборы, использующие эти принципы, относятся к типу лабораторных, их работа связана с пробоотбором и подготовкой измерений. Они не могут быть использованы для непрерывных измерений.

Наиболее точные приборы непрерывного анализа используют следующие методы измерений:

- электрохимический [4], погрешность измерения  $\pm 1.5\%$ ;
- термокондуктометрический [5], основная погрешность  $\pm 2\%$ ;
- фотоионизационный [6], погрешность и воспроизводимость измерений  $\pm 10\%$ ;
- оптический флюoresцентный [7], погрешность измерений  $SO_2 \pm 20\%$ ;
- оптический абсорбционный [8], пределы допускаемой основной погрешности  $\pm 10\%$  (в диапазоне от 50 до 100% НКПР).

Наиболее точным оказывается газовый анализатор BGA244 [9]; он, как и описанный в настоящей статье, использует акустический принцип измерения. В нем не употребляется опорный газ, а измерения термодинамических свойств газовых смесей (скорости звука, температуры и давления газа) проводят порознь. Погрешность измерения состава меньше 0.1%. Скорость измерений – 4 пробы/с.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен широкодиапазонный акустический анализатор двухкомпонент-

ной газовой смеси. Он обеспечивает непрерывный режим измерений с чувствительностью 0.025% и не нуждается в периодической поверке.

Опытная версия прибора используется для измерения состава смеси воздух – фреон 22 в физическом эксперименте. В нем резонатор с датчиком температуры вынесен из прибора в объем с тестируемым газом.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Ю.А. Хохлова за полезные обсуждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов В.Н., Васильев Д.А. Акустический газоанализатор. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 148.
2. Меньшиков В.Г. Акустический газоанализатор. Патент SU № 853520. 1981.
3. <https://www.rosteplo.ru/>
4. <https://granat-e.ru/>
5. <https://www.geo-ndt.ru/>
6. <http://www.metr-k.ru/>
7. <https://www.optec.ru/>
8. <http://www.gasdetecto.ru/>
9. <https://www.optec.ru/>