



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

Препринт 2024–5

В.Н. Алферов, Д.А. Васильев

**Широкодиапазонный акустический анализатор  
двухкомпонентной газовой смеси**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2024

**Аннотация**

Алферов В.Н., Васильев Д.А. Широкодиапазонный акустический анализатор двухкомпонентной газовой смеси: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2024–5. – Протвино, 2024. – 6 с., 3 рис., библиогр.: 2.

Описан датчик состава бинарной газовой смеси с использованием зависимости скорости звука в газе от его молекулярного веса с помощью акустического резонатора. 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.

Ключевые слова: газ, состав, скорость звука, резонатор, частота.

**Abstract**

Alferov V.N., Vasiliev D.A. Wide-range acoustic analyzer of a two-component gas mixture: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2024–4. – Protvino, 2024. – p. 6, fig. 3, refs.: 2.

A binary gas mixture composition sensor is described using the dependence of the speed of sound in the gas on its molecular weight and an acoustic resonator. For analysis, the composition of the mixture must be available one of the gases in pure form. In this case, the measurement error is not worse than  $10^{-4}$ . A mixture with known also can be used as a reference mixture.

## 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).

При детектировании небольших количеств примесного газа к основному можно пользоваться упрощенным способом расчета. 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:

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

где  $\chi$  – относительная концентрация примеси.

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

## Конструкция анализатора

Конструкция в основном повторяет ранее разработанный датчик присутствия водорода в атмосфере мишенной станции, разработанной НИЦ Курчатовский институт – ИФВЭ, для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов [1]. В основе нее лежит запатентованный полуволновой резонатор с диаметром немного меньшим длины и добротностью около 300 на воздухе и диффузионным заполнением [2]. Схематически анализатор приведен на рисунке 1.

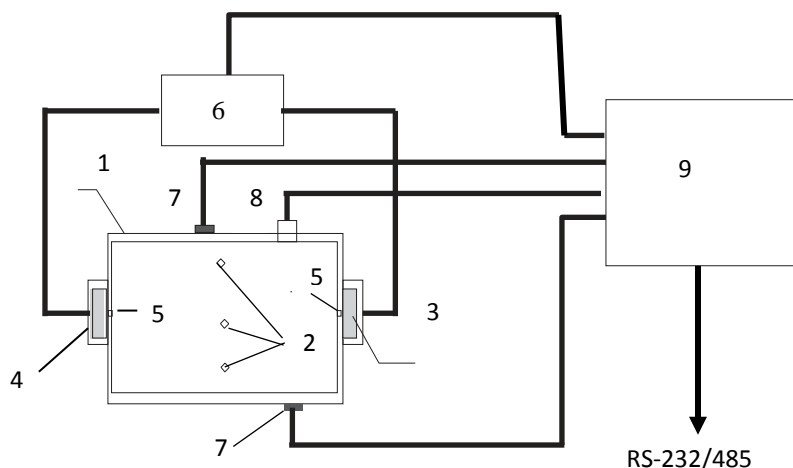


Рис. 1. Блок-схема акустического анализатора.

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

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 датчиками 7. Автогенератор возбуждается на частоте около 5 кГц в атмосфере чистого сухого воздуха, частота измеряется один раз в секунду течение 0,1 секунды 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 выше формулы для скорости газа видно, что если мы знаем измеренную резонансную частоту одного из двух чистых газов с известной молекулярной массой и постоянной адиабаты при известной температуре, можно вычислить резонансную частоту любой смеси этих газов при любой температуре.

При измерении небольших примесей (единицы процентов) не имеет большого значения точность настройки частоты автогенератора на частоту резонанса относительно содержания 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 рисунке 2 для смеси воздуха с фреоном 22.

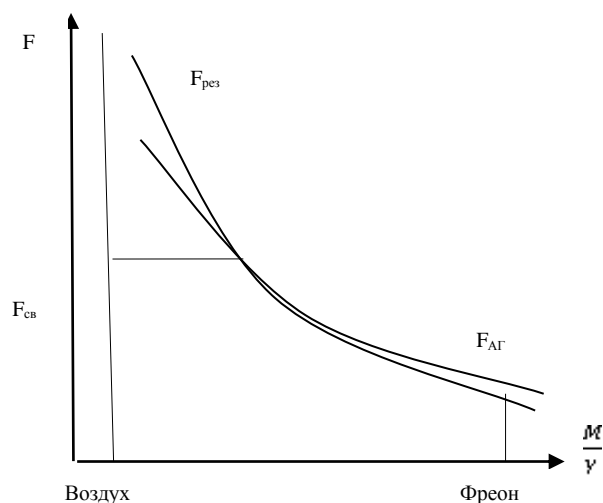


Рис. 2. Резонансная частота резонатора  $F_{рез}$  и частота автогенератора  $F_{АГ}$

в диапазоне  $\sqrt{\frac{M}{\gamma}}$  для смеси воздух фреон 22.

Таким образом, для расчета молекулярной массы смеси газов необходима трехмерная картина зависимостей резонансной частоты резонатора от частоты автогенератора при разных температурах. Температурные зависимости снимаются 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 газа и соответственно резонансной частоты резонатора видно, что для любой молекулярной массы газа произведение  $F_{рез}\sqrt{\frac{M}{\gamma}}$  не зависит от молекулярного веса, а зависит только от температуры (рисунок 3). Точно так же частное от деления резонансной частоты на корень квадратный из абсолютной температуры  $F_{рез}/\sqrt{T}$  не зависит от температуры. С учетом этого погрешность определения резонансной частоты

можно снизить до долей Гц и соответственно молекулярной массы до сотых долей процента.

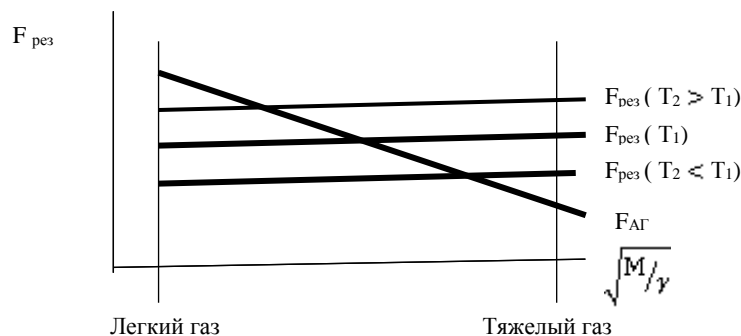


Рис. 3. Зависимости резонансной частоты от  $\sqrt{M/\gamma}$  при разных температурах.

Фазовый диапазон захвата ФАПЧ микросхемы 1561ГГ1 составляет +/- 90<sup>0</sup> между выходным и входным сигналами. Поэтому собственную частоту автогенератора целесообразно выбирать посередине между резонансными частотами чистых газов, как это и показано на рисунке 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% смеси воздуха с гелием. Результирующая погрешность измерения 0.025%.

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



Рис. 4. Внешний вид газоанализатора.

## **Заключение**

Разработан и изготовлен широкодиапазонный акустический анализатор двухкомпонентной газовой смеси. Он обеспечивает непрерывный режим измерений с чувствительностью 0,025%, и не нуждается в периодической поверке. Анализатор может быть полезен, например, при калибровке поверочных газовых смесей.

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.

Авторы благодарят Ю.А. Хохлова за полезные обсуждения.

## **Литература.**

1. Акустический газоанализатор. Приборы и техника эксперимента. Алферов В.Н., Васильев Д.А. 2020, № 5, стр. 148–152.
2. Авторское свидетельство № 853520, МКИ G 01N29/00, 1981.

*Рукопись поступила 9 апреля 2024 г.*



В.Н. Алферов, Д.А. Васильев

Широкодиапазонный акустический анализатор двухкомпонентной газовой смеси.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 11.04.2024                      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.

Печ.л. 0, 6.      Уч.– изд.л. 0, 8.                      Тираж 60.      Заказ 5.                      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 2024-5,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2024

---