

УДК 621.317.39

UDK 621.317.39

**НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СОДЕРЖАНИЯ ТОКСИЧНЫХ
КОМПОНЕНТОВ В ОТРАБОТАВШИХ
ГАЗАХ АВТОМОБИЛЯ**

**NEW METHOD FOR DETERMINATION OF
TOXIC COMPONENTS CONTENT IN
VEHICLE EXHAUST GASES**

*Я. М. Виткалов, Ю. А. Кирдяшкин,
В. В. Мадорский, Х. Масоми*

*I. M. Vitkalov, Y. A. Kirdashkin,
V. V. Madorskiy, Ch. Masomi*

Донской государственной технической
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

epohrbats@Gmail.com

epohrbats@Gmail.com

На основании физических явлений (пироэффекта и изменения температуры газовой среды при адиабатическом расширении или сжатии) разработан метод определения содержания токсичных компонентов (окиси и двуокиси углерода) в отработавших газах автомобиля. Выявлено, что индуцированный в керамике пьезо- и пиро-заряд при воздействии объемного сжатия зависит от толщины чувствительного элемента, частоты и физических параметров акустического поля (плотности и теплоемкости). Научная новизна исследования состоит в следующем: пироэффект и адиабатический процесс сжатия и разряжения в звуковой волне рассмотрены одновременно при разработке инфразвукового теплового приемника с пироэлектрическим чувствительным элементом. Данный метод определения компонент токсичных газов прост в применении, имеет низкую стоимость по сравнению с известными методами, требует малых затрат времени при его использовании. Метод может быть применен для исследования влияния конструкции и параметров работы двигателя на его токсичность, а также для оценки свойств и качеств бензина.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, токсичные выбросы, пироэффект, пьезоэлектрические датчики, газоанализаторы.

A method for determining the content of toxic components (carbon monoxide and dioxide) in vehicle exhaust gases is developed according to the known phenomena in physics: the pyroelectric effect and changes in the temperature of the gaseous medium at the adiabatic expansion and compression. The paper shows that the induced in the ceramics piezo and explosive charge under the influence of volumetric compression depends on the thickness of the sensitive element, the frequency and the physical parameters (density and heat capacity) of the acoustic field. Scientific novelty is in the fact, that the two phenomena: the pyroelectric effect and the adiabatic process of compression and rarefaction in the sound wave are considered simultaneously in the development of infrasound thermal receiver with a pyroelectric sensitive element. This method of determining the components of toxic gases is easy to use, has low cost compared to the known methods, and requires small investment of time when using it. The method can be applied to study the effect of design and operating parameters of the engine on its toxicity; as well as to evaluate the properties and qualities of gasoline.

Keywords: road transport, toxic emission, pyroelectric effect, piezoelectric sensors, gas analyzers.

Введение. Развитие научно-технического прогресса, недостаточность требований по защите окружающей среды, постепенное сокращение свободных неводеланных и лесных территорий привело к исчезновению некоторых форм растительной и животной жизни.

В XX веке появились новые опасные источники загрязнения атмосферы — тепловые двигатели. Интенсивное развитие автомобилизации (с 1963 г. по 1983 г. количество автомобилей увеличилось в 2 раза) способствовало значительному загрязнению воздуха отработавшими газами, особенно в городских и промышленных центрах. В настоящее время автомобильный транспорт оказывает существенное влияние на формирование санитарных условий крупных городов и населенных пунктов.

Первые юридические документы, ограничивающие допустимую концентрацию вредных компонентов в отработавших газах, выбрасываемых в атмосферу двигателями, были разработаны в США в 1969 г. В последующее десятилетие законы, ограничивающие токсичность отработавших газов, стали вводиться во многих европейских странах. Необходимость соблюдать нормы, установленные данными законами, повлекла за собой разработку новых экспериментальных методов анализа, которые позволили осуществлять точную количественную оценку компонентов, содержащихся в отработавших газах. Основными недостатками большинства известных методов являются:

- применение только в лабораторных условиях;
- высокая стоимость;
- использование специальных приборов и устройств;
- трудоемкость.

Целью настоящей работы является разработка нового метода качественного анализа состава отработавших газов автомобилей с искровым зажиганием.

Основные достоинства нового метода:

- простота конструкции, портативность;
- малая стоимость конструкции;
- возможность применения каждым автолюбителем для контроля отработавших газов;
- невысокие затраты времени, менее 1 мин.;
- использование для непрерывного анализа состава газа.

Принцип действия данного устройства основан на известных эффектах — пирозлектричестве и изменении температуры газовой среды при адиабатическом сжатии.

Изменение температуры среды при адиабатическом процессе. Выведем общее уравнение для расчета изменения температуры при адиабатическом процессе в среде. Для малых амплитуд переменного давления ΔP принимаем, что амплитуду изменения температуры ΔT при постоянной энтропии S можно рассчитать по формуле [1]:

$$\Delta T = \Delta P (\partial T / \partial P)_S \quad (1)$$

Адиабатическую производную $(\partial T / \partial P)_S$ можно представить в виде:

$$(\partial T / \partial P)_S = -(\partial S / \partial P)_T / (\partial S / \partial T)_P \quad (2)$$

По определению теплоемкость тела при постоянном давлении равна:

$$c_p = T(\partial S / \partial T)_P \quad (3)$$

Для определения $(\partial S / \partial T)_P$ рассмотрим дифференциал термодинамического потенциала тела:

$$\Phi = U - TS + PV \quad (4)$$

где U — внутренняя энергия; V — объем тела.

Согласно первому закону термодинамики:

$$-(\partial S/\partial P)_T = (\partial V/\partial T)_P, \quad (5)$$

тогда:

$$(\partial T/\partial P)_S = T/c_P (\partial V/\partial T)_P. \quad (6)$$

Введем удельную теплоемкость c и коэффициент объемного теплового расширения β_p :

$$c = c_P/m; \quad \beta_p = 1/V (\partial V/\partial T)_P, \quad (7)$$

где m — масса тела.

Подставляя эти величины в (5)–(6), получим окончательное выражение:

$$(\partial T/\partial P)_S = \beta_p T/(c^* \rho), \quad (8)$$

где ρ — плотность.

Используя уравнение Клайперона-Менделеева, получим:

$$(\partial V/\partial T)_P = mR/\mu P, \quad (9)$$

где μ — молярная масса газа; R — универсальная газовая постоянная.

Тогда:

$$(\partial T/\partial P)_S = TR/(c_m P), \quad (10)$$

где c_m — молярная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Используя соотношение (7), (10), получим:

$$(\partial T/\partial P)_S = \beta_p T/(c \rho). \quad (11)$$

Постановка и анализ краевой термоупругой задачи. Рассмотрим пьезоэлектрический элемент (ПЭ) в форме диска радиуса b , толщиной $2h$. Введем цилиндрическую систему координат $\{r, \theta, z\}$ с осью Oz , параллельной оси поляризации. Торцевые поверхности диска полностью покрыты электродами, на боковой поверхности электроды отсутствуют.

Электротермоупругое напряженно-деформированное состояние ПЭ описывается системой дифференциальных уравнений [2, 3], включающей уравнения движения, соотношения Дюгамеля-Неймана и Коши для изотропных слоев, прямого пьезо- и пирозэффекта, электростатики для пьезокерамического элемента, а также уравнением теплопроводности для всех элементов пакета [4]:

$$\partial \theta / \partial t = \nu \nabla^2 \theta, \quad (12)$$

где $\theta = \Delta T$ — изменение температуры ПЭ, являющееся функцией координат и времени t ; ∇^2 — оператор Лапласа; $\nu = \lambda/(c \rho)$ — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности, c — удельная теплоемкость.

Рассмотрим граничные условия (механические, электрические, тепловые).

Механические граничные условия:

всестороннее квазистатическое давление $P = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$:

при $z = H_2, -H_3$: $\sigma_{zz}^{(1)} = \sigma_{zz}^{(3)} = P$; $\sigma_{rz}^{(1)} = \sigma_{rz}^{(3)} = 0$;

при $r = d/2$: $\sigma_{rr} = P$; $\sigma_{rz} = 0$. (13)

Электрические граничные условия:

при $z = \pm H$: $\varphi = 0$ (условие короткого замыкания); (14)

при $r = d/2$: $D_r = 0$.

Тепловые граничные условия:

на границах задается зависимость теплового потока между телом и окружающей средой или закон Ньютона для теплового взаимодействия, применяемый при исследованиях теплопередачи в

твердых телах, обтекаемых потоками жидкости или газа [4]. При этом заданы α — коэффициент теплообмена (теплоотдачи) и θ_c — температура среды.

Введем понятие эффективного объемного пьезомодуля d_{ef} :

$$d_{ef} = D_z P_1, \quad (15)$$

где D_z — компонента вектора электрической индукции, параллельная нормали к площади электродов; P_1 — амплитуда всестороннего переменного давления.

Эффективный пьезомодуль учитывает вклад пьезоэффекта и пироэффекта, а также любого другого физического механизма через вектор электрической индукции.

Для определения значения d_{ef} проинтегрируем D_z по координате z от $-h$ до $+h$. В итоге получим при условии короткого замыкания:

$$d_{ef} = d_v + \kappa / (2h) \int \theta_2 dz, \quad (16)$$

где κ — пироконстанта; θ_2 — температура ПЭ.

В квазистатическом приближении из (11)–(15) можно получить формулу для определения эффективного объемного пьезомодуля d_{ef} с учетом пироэффекта в следующем виде:

$$d_{ef} = d_v + \alpha \beta_0 T_0 \kappa / (c_0 \rho_0 \omega H_1 c_k \rho_k). \quad (17)$$

В (17) индекс 0 относится к среде, индекс k — относится к ПЭ, β_0 — коэффициент объемного расширения среды.

Из (17) следует, что d_{ef} , определяющий коэффициент передачи (КП) давления в заряд, состоит из двух слагаемых: одно из них зависит от объемного пьезоэффекта, другое — от пироэффекта. Пироэлектрическая добавка является функцией объемного расширения среды, толщины ПЭ, частоты акустического поля, коэффициента теплообмена среды ПЭ и других факторов. При измерениях в газе (воздухе) на низких частотах тонких ПЭ вклад пироэффекта может существенно превышать вклад пьезоэффекта в выходной сигнал.

Подставляя соотношение (11) в (17), получим:

$$d_{ef} = d_v + \alpha \beta_0 T_0^2 \kappa R / (P \mu c_0 \rho_0 \omega H_1 c_k \rho_k). \quad (18)$$

Из (18) видно, что пироэлектрическая поправка к объемной чувствительности обратно пропорциональна избыточному давлению газа.

В отличие от известных соотношений для КП, в него входит не эффективная площадь мембраны, а площадь электродов ПЭ, а вместо продольного или поперечного пьезомодулей — эффективный объемный пьезомодуль. Последний не только отражает свойства ПЭ, но и, в соответствии с формулой (18), зависит от геометрии ПЭ и свойств окружающей среды.

Разработка методики для непрерывного анализа отработавших газов. Точно определить количество вредных выбросов в атмосферу автомобильными двигателями практически невозможно. Величина выброса вредных веществ зависит от многих факторов, таких как конструктивные параметры, процессы подготовки и сгорания смеси, режим работы двигателя, его техническое состояние. Однако для среднестатистического двигателя и смеси можно определить средний состав отработавших газов для двигателя с искровым зажиганием (таблица 1) из [5].

Таблица 1

Состав и процентное содержание отработавших газов

Компоненты	Проценты
Азот	74...77
Кислород	0.3...8
Водяной пар	3.0 ...5.5
Двуокись углерода	5.0...12
Окись углерода	0.7...2.0
Оксиды азота	0...0.8
Углеводороды	0.2...3
Сажа	0...0.4 г/м ³
Альдегиды	0...0.2

Из приведенных компонентов состава газа особое внимание уделим окиси CO и двуокиси CO_2 углерода.

На основании статистических данных можно определить, что типичный легковой автомобиль в течение года выделяет следующее количество токсичных компонентов: окиси углерода — 378 кг, углеводородов — 110 кг, окислов азота и серы — 20 кг, сажи — 2 кг [4]. За 1969 г. количество окиси углерода, выделенных автомобилями США, составило 66 млн тонн, что значительно превышает все другие токсичные компоненты [6].

Количество двуокиси углерода в настоящее время ежегодно увеличивается на 1–2%, что связано с огромным потреблением кислорода при различных процессах сгорания источников энергии, в том числе в двигателях. Это приводит к выделению в атмосферу большого количества двуокиси углерода и резкому сокращению зеленых массивов на земном шаре. Данное явление представляется очень опасным. Специалисты по охране окружающей среды еще в 1980 году обратились с призывом — необходимо сократить или полностью исключить применение двигателей внутреннего сгорания, в тех областях человеческой деятельности, где это возможно, так как эти устройства являются основным источником загрязнения атмосферы двуокисью углерода [7].

Для анализа состава отработавших газов по формуле (18) необходимо знать плотность и теплоемкость его компонентов (таблица 2).

Таблица 2

Параметры отработанных компонентов газа

Компонент	Плотность, кг/м ³	Уд. теплоемкость, кДж/кг·град
Воздух	1.29	1 009
CO	1.25	1.043
CO_2	1.98	0.846

Коэффициент объемного расширения для газов практически одинаков и равен $3.666 \cdot 10^{-3}$, 1/град. Блок-схема газового детектора с пироэлектрическим чувствительным элементом представлена на рис. 1.

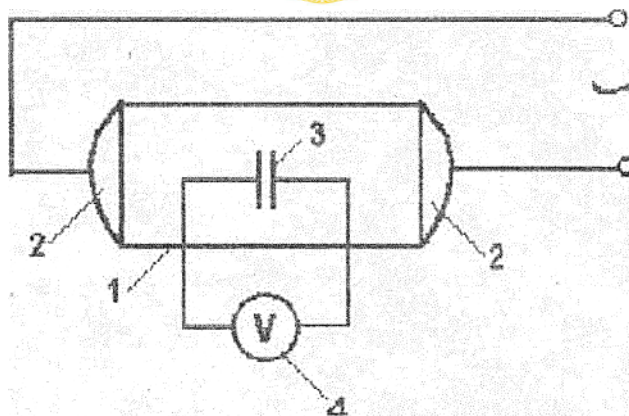


Рис. 1. Блок-схема газового пьезоэлектрического детектора:

1 — газовая камера; 2 — электромагнитные динамики; 3 — пьезоэлемент; 4 — измерительный прибор

Отработавший газ поступает в камеру. Затем, при помощи двух динамиков, создается режим адиабатического сжатия-расширения. Индуцируемый сигнал измеряется на входе измерительным прибором, например, вольтметром с сопротивлением на входе 1 ГОм.

Для исключения влияния нестабильности температуры окружающей среды на показания пьезоэлектрического приемника ультразвука полезно применить не один чувствительный пьезоэлемент, а два идентичных элемента, работающих параллельно и разнесенных в пространстве. В этом случае второй пьезоэлемент служит для термокомпенсации подобно холодному спаю дифференциальной термопары.

В таблице 3 представлены результаты расчета регистрируемого напряжения для газа, состоящего из $\Delta m_1\%$ окиси углерода и $\Delta m_2\%$ двуокиси углерода. Условие $\Delta m_1 = \Delta m_2 = 0$ соответствует «чистому газу» — воздуху.

Таблица 3

Пример расчета

$\Delta m_1\%$	$\Delta m_2\%$	Один пироприемник, мВ	Два пироприемника, мВ
0	0	92.4	0
0.25	0.25	91.87	0.54
0.5	0.5	91.33	1.09
10	0	91.16	1.25
0	1	91.5	0.92
1	1	90.27	2.15
2	2	88.21	4.2
3	3	86.25	6.16
4	4	84.37	8.04

Толщина пьезоэлемента ПКД-233/18 равна 1 мм, площадь составляет 1 см², амплитуда акустического давления в камере — 200 Па, частота — 1 Гц. Чувствительность рассматриваемого метода можно увеличить, повышая амплитуду давления или уменьшая частоту.

Для усиления пьезоэлектрического сигнала при дальнейшей его обработке можно использовать электронные схемы усилителей напряжений [8, 9].

Заключение. Арсенал технической акустики насчитывает много физических явлений, положенных в основу измерительных приборов. Среди них пирометрические и теплотрические

преобразователи, которые применяются в областях, где тепловое преобразование является эффективным средством получения информации о физических и биологических процессах.

В настоящей работе предложен новый тип инфразвукового теплоакустического пиропреобразователя, принцип действия которого основан на измерении изменения температуры при адиабатическом расширении-сжатии газовой среды. Дифференциальная схема включения подобранных пар пьезоэлементов позволяет получить сигнал, обратно пропорциональный произведению плотности и теплоемкости окружающей среды.

В отличие от известных способов измерений, в предложенном методе отсутствуют некоторые элементы конструкций (например, баллоны с газом-носителем, хроматографические колонки с жидким сорбентом, специальные электроды (твердый сорбент) для выделения тепла в результате химической реакции с исследуемым газом). Именно на этом основана работа пироэлектрических датчиков в хроматографических детекторах, используемых для определения многокомпонентных газовых смесей. Минимально детектируемая концентрация в предложенном методе составляет в объемных долях для окиси углерода 0,1 %, для двуокиси — 0,08 %.

Для увеличения чувствительности метода можно использовать специальные типы пьезокерамики, которые обладают высокими пироэлектрическими свойствами и низкой диэлектрической проницаемостью, увеличить пульсирующее давление в камере, применить специальные электронные схемы усиления по напряжению, а также усилители со 100% отрицательной обратной связью по заряду.

Библиографический список.

1. Ландау, Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. — Москва : Наука, 1976. — 383 с.
2. Устинов, Ю. А. Электроупругость. Некоторые вопросы математического моделирования / Ю. А. Устинов // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 9. — С. 122–127.
3. Най, Дж. Физические свойства кристаллов / Дж. Най. — Москва : Иностранная литература, 1967. — 386 с.
4. Мотовиловец, И. А. Теплопроводность пластин и тел вращения / И. А. Мотовиловец. — Киев : Наукова Думка, 1969. — 144 с.
5. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. — Москва : Наука, 1972. — 348 с.
6. Якубовский, Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Ю. Якубовский. — Москва : Транспорт, 1979. — 198 с.
7. Транспортные проблемы города и пути их разрешения [Электронный ресурс] / Реферат. — Режим доступа : <http://twidler.ru/> (дата обращения : 03.02.16).
8. Датчики и преобразующая аппаратура. Каталог НИИ физических измерений. — Пенза, 2001. — 157 с.
9. Левшина, К. С. Электрические измерения физических величин / К. С. Левшина, И. В. Новицкий. — Москва : Энергоатомиздат, 1973. — 130 с.