

доктор техн. наук **Козубовский В.Р.**, профессор кафедры технологии машиностроения УжНУ /  
prof. **Kozubovskiy V.R.**, Ph.D.<sup>1</sup>

инж. **Мисевич И.З.** / **Misevich I.Z.**, Eng.<sup>2</sup>

кандидат техн. наук **Иванчук М.М.** / **Ivanchuk M.M.**, Ph.D.<sup>2</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 14.07.2015;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 09.11.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2015;

## Сравнительный анализ датчиков газовых извещателей для раннего обнаружения пожара<sup>3</sup>

### Comparative Analysis of Sensors Contained in Gas Detectors Designed For Early Fire Detection

### Analiza porównawcza czujników wykorzystywanych w czujkach gazu do wczesnego wykrywania pożaru

#### АННОТАЦИЯ

**Цель:** Цель данной статьи помочь разработчику пожарных извещателей выбрать датчик для канала углекислого газа (СО) в мультисенсорном пожарном извещателе. Если Вы ознакомитесь с монографиями по датчикам, то наверняка обнаружите много подходящих датчиков для анализа СО. Каждый из датчиков имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому сделать выбор достаточно трудно. Мы, на основе своего многолетнего опыта по разработке и постановке на производство приборов газового анализа и пожарных извещателей предложим наиболее подходящие варианты.

**Введение:** В настоящее время для обнаружения пожара широко используются дымовые извещатели (часто с датчиком температуры). Однако они имеют ряд недостатков – не селективные по отношению к дыму (воспринимают как дым аэрозоли, пары воды, пары приготовления пищи, пыль). Пожарный извещатель СО свободен от этих недостатков, поскольку он является селективным по отношению к СО. Поэтому был разработан ряд перспективных Европейских стандартов и международных стандартов, которые предусматривают анализ СО для обнаружения пожара. Конечно, большие концентрации СО могут возникнуть и в помещениях, где курят, где есть отопительные приборы на твердом и газообразном топливе, в гаражах и подземных парковках. Мультисенсорные же извещатели, имеющие два канала раннего обнаружения пожара – СО и дымового, компенсирует недостатки каждого канала и при одновременном срабатывании обоих каналов можно с уверенностью утверждать, что мы имеем дело с пожаром на ранней стадии его развития, а не с пылью, парами воды, аэрозолями или просто большой концентрацией СО. Для канала СО существующие стандарты рекомендуют использовать электрохимические датчики.

**Методы:** В статье описаны технические параметры наиболее подходящих для контроля СО электрохимических датчиков – электролитических на основе кислотных электролитов и металл-оксидных полупроводников, а именно Nap-508 (505) и TGS2442. Описан также принцип действия и рекомендуемые схемы подключения. Эти датчики специально разрабатывались для создания на их основе пожарных извещателей газовых, прошли все испытания в соответствии с требованиями, предъявляемые к пожарным извещателям. Отмечено, что метал-оксидные датчики имеют более приемлемые эксплуатационные характеристики – более широкий рабочий диапазон температур, большой срок сохраняемости, отсутствие в своем составе агрессивных сред. К их недостаткам следует отнести сравнительно большое энергопотребление ~ 15 мВт.

**Выводы:** Рассмотрены перспективы развития технологий изготовления металл-оксидных полупроводниковых датчиков. Указано, что применение микро и нано технологий при изготовлении этих датчиков решит вопрос уменьшения их энергопотребления до уровня, достаточного для изготовления автономных пожарных извещателей с питанием от батарейки. Уже сейчас фирма Фигаро разработала датчик TGS8410 со средним энергопотреблением 0,087 мВт.

**Ключевые слова:** пожар, извещатель, мультисенсорный, дым, газ, датчик, концентрация, электрохимический, металл-оксидный, электролитический

**Вид статьи:** обзорная статья

<sup>1</sup> Ужгородский национальный университет, Украина / Uzhhorod National University, Ukraine; kozub@hotmail.com;

<sup>2</sup> ЧП «АРТОН», Черновцы, Украина / ARTON, Chernivtsi, Ukraine;

<sup>3</sup> Процентное соотношение участия в подготовке статьи / Percentage contribution: Kozubovskiy V.R. – 50%; Misevich I.Z. – 25%; Ivanchuk M.M. – 25%;

**ABSTRACT**

**Aim:** The purpose of this article is to help designers of fire detectors with the selection of a carbon monoxide (CO) sensor for a multi-sensor fire detector. Academic work on detectors provides an abundance of material about sensors suitable for CO analysis. Each sensor has its advantages and disadvantages. Therefore, choosing a suitable sensor is quite difficult. The authors, based on their extensive experience in the development and production of devices for gas analysis and fire detectors, propose most adequate solutions.

**Introduction:** Current devices for discovering a fire, work on the principle of detecting smoke, often incorporating a temperature sensor. However, these have many disadvantages. They do not function in a discerning way in relation to smoke (aerosols, water vapour, cooking vapour and dust are all identified as smoke). A CO fire detector is free of these shortcomings, since it is selective and reacts to CO. For this reason many perspective European norms and international standards emerged, which recommend CO analysis for detection of fires. Obviously, high concentrations of CO can occur in areas where people smoke, where heating appliances utilising solid and gaseous fuels are used, in garages and in underground car parks. Multi-Sensor Detectors with two methods of detecting fire, CO and smoke, compensate shortcomings of each method. It can be confidently stated that through a simultaneous response from both detection methods, a fire will be dealt with at an early stage of development and resources will not be sidetracked by dust, water vapour, aerosols or high concentration of CO. For detection of CO, existing standards recommend the use of electrochemical sensors.

**Methods:** The article describes the technical parameters of the most appropriate electrochemical sensors for monitoring of CO. These are electrolytic, based on acidic electrolyte and metal oxide semiconductors, namely Nap-508 (505) and TGS2442. The principles of operation and recommended circuit connection are suitably described in the article. The sensors are specially designed for use with gas fire detectors and were tested in accordance with requirements for fire detectors. It is noted that metal-oxide sensors have the most acceptable performance characteristics, across the broadest temperature range, long period of validity and absence of aggressive substances in composite elements. Among its disadvantages is a relatively high power consumption ~ 15 mW.

**Conclusions:** Examined prospects for the development and production of metal oxide semiconductor sensors. It is indicated that the use of micro and nanotechnology in the manufacture of sensors will solve the problem of reducing energy consumption to a level sufficient for the production of self-contained smoke detectors powered by batteries. At present, Figaro has developed a sensor TGS8410 with an average power consumption of 0.087 mW.

**Keywords:** fire, detector, multisensory, gas, sensor, concentration, electrochemical, electrolytic, oxidic

**Type of article:** review article

**ABSTRAKT**

**Cel:** Celem artykułu jest udzielenie wskazówek konstruktorom czujek pożarowych odnośnie wyboru czujników tlenku węgla w komorze wielosensorowej czujki pożarowej. W monografiach poświęconych tej tematyce znaleźć można wiele czujników nadających się do analizy CO. Każdy czujnik ma swoje zalety jak i wady. W związku z tym wybór odpowiedniego czujnika jest dość trudny. Autorzy, na bazie wieloletniego doświadczenia w projektowaniu i produkcji przyrządów do analizy gazowej i czujek pożarowych, zaproponowali najbardziej adekwatne rozwiązanie.

**Wprowadzenie:** Obecnie do wykrywania pożarów bardzo często wykorzystywane są czujki dymu (zwykle z czujnikiem temperatury). Mają one jednak wiele wad – nie działają w sposób selektywny na dym (rozpoznają jako dym aerozole, parę wodną, parę powstającą przy gotowaniu, kurz). Czujka pożarowa CO nie ma takich wad, ponieważ reaguje wyłącznie na CO. Dlatego powstało wiele perspektywicznych norm europejskich i standardów międzynarodowych, które do wykrywania pożarów przewidują analizę CO. Oczywiście, duże stężenia CO mogą powstać w pomieszczeniach, w których pali się papierosy, również tam gdzie znajdują się urządzenia ciepłownicze na paliwo stałe lub gazowe, w garażach i parkingach podziemnych. Wielosensorowe czujki, wykorzystujące dwie komory wykrywania pożaru – CO i dymu, rekompensują wady każdej z tych komór. Przy jednoczesnej aktywacji obu, można z pewnością stwierdzić, że mamy do czynienia z pożarem w wczesnym stadium rozwoju, a nie z kurzem, parą wodną, aerozolem lub po prostu dużym stężeniem CO. Do wykrywania CO odpowiednio nomy rekomendują użycie czujników elektrochemicznych.

**Metody:** W artykule opisano parametry techniczne najbardziej odpowiednich do kontroli CO czujników elektrochemicznych na bazie elektrolitów kwasowych i półprzewodników tlenkowych, a dokładnie Nap-508 (505) i TGS2442. Opisano również zasady pracy i zalecane schematy połączeń. Czujniki te były opracowywane specjalnie do wykorzystania w pożarniczych czujkach gazu i przeszły wszystkie badania zgodnie z wymogami dla czujek pożarniczych. Zaznaczono, że czujniki tlenkowe mają najbardziej akceptowalne charakterystyki eksploatacyjne – najszerszy zakres temperatur, długi termin ważności, brak w składzie elementów środowiska agresywnego. Do ich wad należy względnie duże zużycie energii ~ 15 mW.

**Wnioski:** Rozpatrzono perspektywy rozwoju technologii produkcji półprzewodnikowych czujników tlenkowych. Wskazano, że zastosowanie mikro- i nanotechnologii przy produkcji tych czujników rozwiązuje kwestię zmniejszenia zużycia energii do poziomu dostatecznego do przygotowania autonomicznych czujek pożarniczych zasilanych baterią. Już teraz firma Figaro opracowała czujkę TGS8410 za średnim zużyciem prądu 0,087 mW.

**Słowa kluczowe:** pożar, czujka, wielosensorowy, dym, gaz, czujnik, stężenie, elektrochemiczny, tlenkowy, elektrolityczny

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

**1. Цель**

Целью данной статьи является раскрытие особенностей применения современных электрохимических датчиков в составе мультисенсорных пожарных извещателей.

**2. Введение**

Анализ окиси углерода как предвестника пожара становится все более актуальным в последнее время. Хотя сейчас для обнаружения пожара широко используются дымовые извещатели (часто с датчиком

температуры), они имеют ряд недостатков – не селективные по отношению к дыму (воспринимают как дым аэрозоли, пары воды, пары приготовления пищи, пыль). Пожарный извещатель оксида углерода (СО) свободен от этих недостатков, он является селективным по отношению к СО и поэтому был разработан ряд Европейских стандартов (EN 54-26, EN 54-30, EN 54-31) [1–3] и международных стандартов (ISO 7240-6, ISO 7240-8, ISO 7240-27) [4–6], которые предусматривают анализ СО для обнаружения пожара. Конечно, большие концентрации СО могут возникнуть и в помещениях, где курят, где есть отопительные приборы на твердом и газообразном топливе, в гаражах и подземных парковках. Но эти помещения можно легко отсечь и не рекомендовать устанавливать в этих помещениях пожарные извещатели газовые (ПИГ). Извещатели СО чаще всего входят в состав мультисенсорных пожарных извещателей в качестве одного из каналов получения информации о пожароопасной ситуации. Каждый датчик мультисенсорного извещателя чувствителен к тому или иному типу пожара, а их совокупность позволяет однозначно идентифицировать пожар. Действительно, скажем СО извещатель, чувствителен к тлению углеродосодержащего материала (типы пожаров TF2, TF3, TF9). Т.е. определяет пожар на начальной стадии его развития. Тепловой канал определяет пожар по повышению температуры в помещении (типы пожаров TF1, TF5, TF6 – когда идет полноценное горение). Дымовой канал тоже чувствителен к пожарам типа TF2, TF3, TF9, однако не чувствителен к СО. Это дает возможность отсечь варианты больших концентраций СО при отсутствии пожара. Т.е. сочетание двух каналов раннего обнаружения пожара – СО и дымового компенсирует недостатки каждого канала и при одновременном срабатывании обеих каналов можно утверждать, что мы имеем дело с пожаром на ранней стадии его развития, а не с пылью, парами воды, аэрозолями или большой концентрацией СО. Однако бывают случаи, когда помещение задымленное, есть небольшая концентрация СО, а пожара нет (например, при запуске котла на твердом топливе и отсутствии достаточной тяги). В этом случае, возможно, необходимо контролировать температуру в помещении. Конечно, температура срабатывания не должна быть большой

или необходимо контролировать скорость нарастания температуры. Иначе, о каком раннем обнаружении пожара может идти речь? Т.е. для конкретных типов помещений и конкретных задач должны быть определены критерии оценки пожароопасных ситуаций с учетом вероятности разных событий и их корреляции. Именно этому варианту мультисенсорного извещателя (канал СО, дыма и тепла) и посвящены стандарты EN 54-31, ISO 7240-27.

С другой стороны, СО является токсичным газом и большие концентрации СО приводят к смертельным случаям. СО блокирует перенос кислорода кровью, возникает кислородное голодание и человек теряет ориентацию, сознание и умирает. Т.е. большие концентрации СО (больше 40 ppm) являются опасными и срабатывание извещателя СО говорит об опасности или пожара или отравления. Стандарт LPS 1282 [7] рекомендует в случае использования мультисенсорного пожарного извещателя с датчиками СО, дыма и, возможно, тепла, разделять сигналы пожара и загазованности помещений СО. Можно конечно утверждать, что нет необходимости разделять эти сигналы. Раз есть сигнал опасности, то надо просто покинуть помещение. Однако дело в том, какие в последующем предпринять шаги. Вызвать пожарных, проветрить помещение, или вызвать скорую помощь.

### 3. Датчики для канала СО

Все указанные выше стандарты оговаривают использования в канале СО электрохимических газовых датчиков. Электрохимические газовые датчики можно разделить на два больших класса:

- датчики, электрохимическая реакция в которых происходит на поверхности материала, чаще всего металл-оксидного полупроводника;
  - датчики, электрохимическая реакция в которых происходят на электродах, помещенных в электролит.
- Эти два класса можно разделить на различные типы, подтипы, но мы не будем утруждать читателей этой статьи сложной классификацией, а рекомендуем, в случае возникновения желания детально разобраться в вопросе, обратиться к работам [8–9].

Каждый класс имеет свои недостатки и преимущества. Сравнение их параметров приведено в табл. 1.

**Таблица 1.** Сравнение основных технических характеристик электрохимических датчиков

Параметр	Принцип детектирования	
	Электрохимия объемная	Электрохимия поверхности
Линейность	Линейный	Логарифмический
Время отклика и восстановления	Быстрое	Очень быстрое
Селективность	Хорошая	Слабая
Влияние влаги	Не влияет	Незначительная
Механическая стойкость	Хорошая	Хорошая
Потребляемая мощность	Отсутствует	Незначительная

**Источник:** Собственная разработка.

**Table 1.** Comparison of the main technical characteristics of electrochemical sensors

Parameter	Detection principle	
	Electrochemistry volumetric	Surface electrochemistry
Linearity	Linear	Logarithmic
The response and recovery times	Fast	Very fast
Selectivity	Good	Low
Moisture influence	Not affect	Negligible
Mechanical resistance	Good	Good
Consumption power	No	Negligible

Source: Own elaboration.

Как видно из табл. 1 электрохимические реакции при использовании электролита дают возможность получить более приемлемые технические характеристики датчиков. Однако эксплуатационные характеристики металл-оксидных датчиков несколько лучше – это полупроводниковые изделия, и, как и все подобные, имеют большой срок сохраняемости и службы. Для электролитических датчиков ситуация противоположная. Действительно, кто может, например, гарантировать, что электролит не вытечет из ячейки? Если это произойдет, то пострадает весь прибор (аналогия батарейки на плате компьютера). Правда, в некоторых датчиках используют сгущенный электролит. Однако такие датчики не работают при высоких температурах и чувствительны к влаге. Кроме того, при достаточно больших фоновых концентрациях CO постоянно идет электрохимическая реакция и, естественно, ресурс электролита не безграничен.

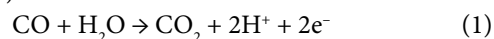
Чтобы оценить перспективы датчиков обоих типов нам придется рассмотреть их конструкцию и принцип их действия.

#### 4. Конструкция, принцип действия и технические характеристики бытовых электролитических датчиков фирмы NEMOTO [10]

Это относительно недорогие, малогабаритные датчики с большим сроком службы NAP-505, NAP-508. Они по конструкции идентичны и отличаются сроком службы – более 7 и более 10 лет, соответственно. Возможно, отличие в сроке службы достигается за счет количества электролита.

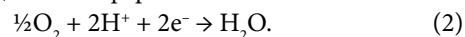
Датчик NAP-508 (NAP -505) состоит из трех пористых электродов с использованием благородных металлов, разделенных насыщенными парами водного раствора кислотного электролита, который находится в пределах пластикового корпуса. Газ поступает в электролитическую ячейку через газо-фазовый диффузный барьер (капилляр) и угольный фильтр, который удаляет нежелательные газы, мешающие работе датчика и приводящие к выдаче ложного сигнала. Резервуар с электролитом обеспечивает необходимое давление насыщенных паров электролита и датчик вентилируют, чтобы обеспечить равновесие внутреннего и внешнего давления датчика.

В процессе работы газ проникает в ячейку через капилляр и фильтр, и вступает в контакт с рабочим электродом. Присутствующая в газовой пробе окись углерода подвергается следующей химической реакции (окисления):



Генерируемый  $\text{CO}_2$  выводится наружу из ячейки через капилляр, а ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) мигрируют в электролите внутри ячейки. Электроны ( $\text{e}^-$ ), генерируемые на рабочем электроде, поступают во внешнюю цепь через металлический контакт в виде небольшого (nA) электрического тока.

Реакция на рабочем электроде уравнивается взаимной (восстановительной) реакцией на измерительном (счетном) электроде, с помощью кислорода из окружающей атмосферы:



Электроны, используемые в этой реакции, протекают по внешней цепи через металлическую контактную полосу счетного электрода.

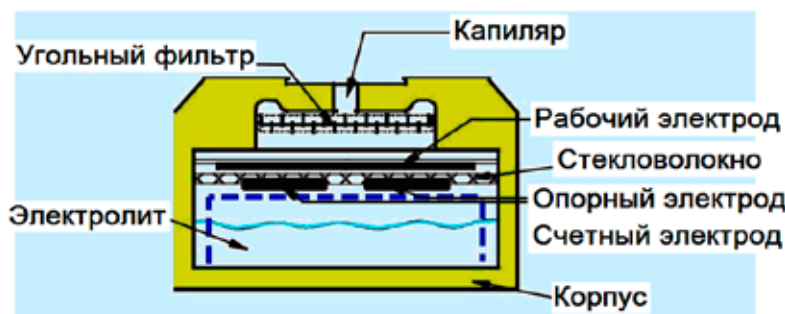


Рис. 1. Конструкция электрохимического датчика NAP-508 [10]

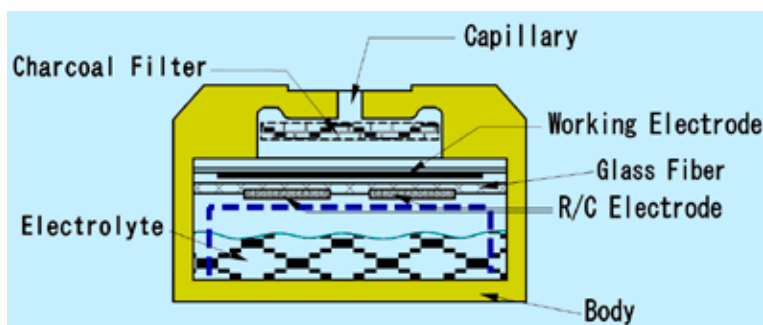


Fig. 1. Design of electrochemical carbon monoxide gas sensors NAP-508 [10]



Рис. 2. Принцип действия датчика NAP-508 [10]

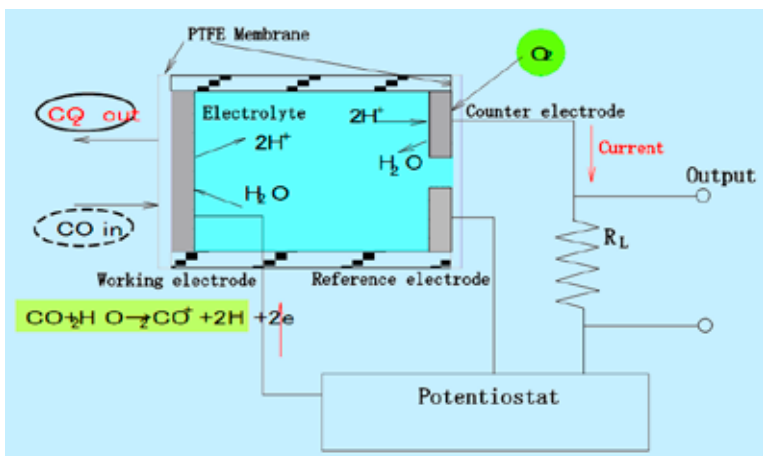


Fig. 2. Schematic representation of the CO sensor NAP-508 and meter-current circuit [10]

Таким образом, в то время как ионы водорода генерируются на рабочем электроде, вода потребляется. В это же время ионы водорода потребляются измерительным электродом, и вода воссоздается заново. Электрохимическая реакция на рабочем электроде генерирует электроны, в то же время реакция на измерительном электроде потребляет электроны. Соединив рабочий и измерительный электроды вместе с помощью специального контура, поток электронов между двумя электродами измеряется как уровень токового сигнала в нА, пропорциональный концентрации монооксида углерода.

Электрод сравнения сохраняет работоспособность ячейки. Он окружен электролитом, не контактирует

с газом и ток не проходит через него. Его электрохимический потенциал, следовательно, всегда остается постоянным на уровне известного как «потенциал покоя воздуха», и он используется для регулирования потенциала рабочего электрода, независимо от тока, генерируемого во время его работы. Таким образом, использование электрода сравнения (трехэлектродное функционирование) помогает расширить рабочий диапазон датчика, улучшить линейность и дает ряд преимуществ по сравнению с похожими датчиками, работающими только с двумя электродами. Ниже приведены основные технические характеристика датчика NAP-508 [10].

**Таблица 2.** Основные технические характеристики электролитического датчика NAP-508

Характеристика	Значение
Детектируемый газ	Монооксид углерода
Диапазон детектируемых концентраций	0 ... 1000 ppm
Выходная чувствительность	20 ± 5 nA/ppm
Смещение нуля при 20°C	Эквивалентно 5 ppm
Время отклика (измерение T90T)	< 30 с
Точность измерения	± 2%
Температурная зависимость	± 15 ppm (в диапазоне -20 ... +50°C)
Долговременный дрейф	< 3% в год
Ожидаемая продолжительность работы	> 10
Диапазон температур	-20 ... 50°C
Диапазон влажности	15 ... 90% RH
Давление	1±0,1 Атм
Рекомендуемая температура хранения	0 ... 20°C
Рекомендуемое максимальное время хранения	10 месяцев
Вес	2,6 г

**Источник:** Собственная разработка.

**Table 2.** Main specifications of electrolytic sensor NAP-508

Specifications	Value
Detectable Gas	Carbon monoxide (CO)
Standard concentration range	0–1000 ppm
Output Current	20 ± 5 nA/ppm
Zero Offset at 20°C	<+/- 5ppm equivalent
Response Time (Measured as T90T)	< 30 с
Accuracy (Measured as Repeatability)	± 2%
Temperature Dependence (Zero)	± 15 ppm (-20°C to +50°C)
Long Term Sensitivity Drift	< 3% / year
Expected Lifetime in the field	> 10
Temperature Range	-20 ... 50°C
Standard constant Humidity Range	15 ... 90% RH
Standard Constant Pressure Range	1 ± 0,1 atm
Recommended storage Temperature Range	0 ... 20°C
Recommended Maximum Storage Time	10 months
Weight	2,6 g

**Source:** Own elaboration.

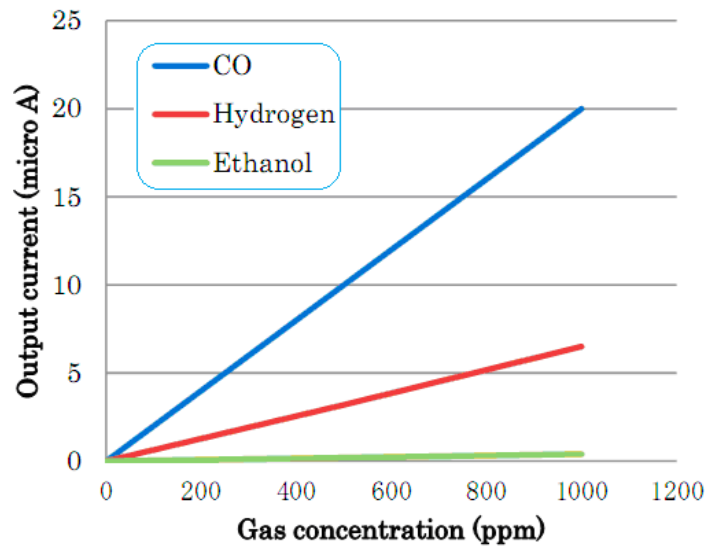


Рис. 3. График чувствительности к разным газам [10]  
 Fig. 3. The graph of sensitivity characteristics for various gases [10]

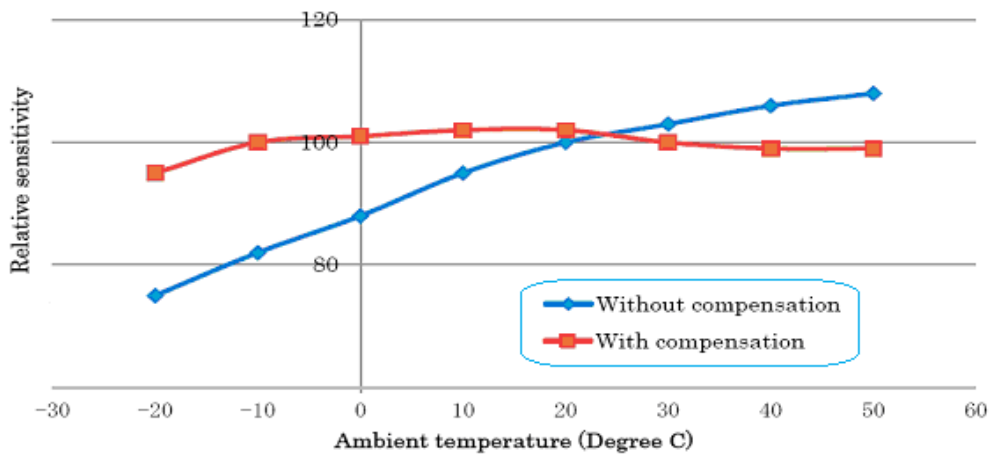


Рис. 4. Зависимость чувствительности от температуры [10]  
 Fig. 4. Relationship between the signal sensitivity and the temperature [10]

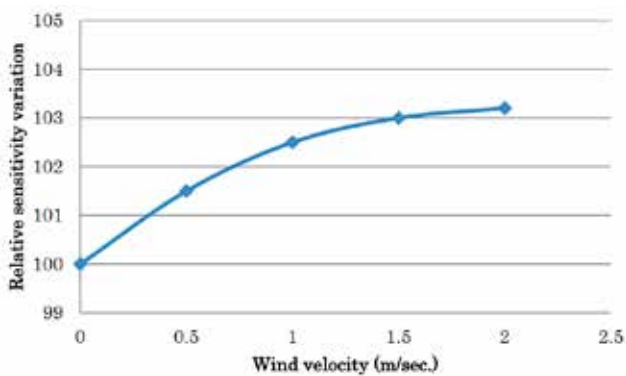


Рис. 5. Зависимость чувствительности от скорости ветра/воздушного потока [10]  
 Fig. 5. Wind / Flow influences [10]

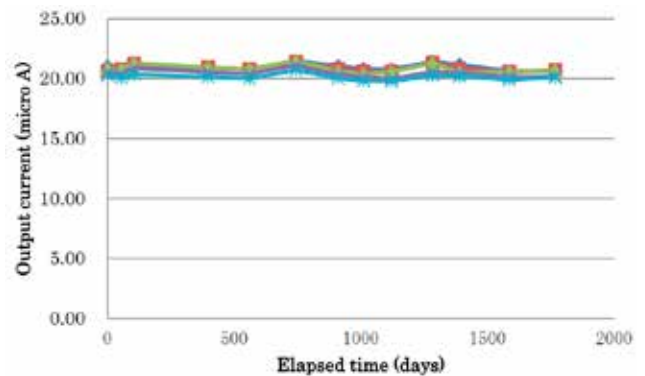


Рис. 6. Долговременная стабильность [10]  
 Fig. 6. Long term stability [10]

**Таблица 3.** Время отклика датчика при разных температурах [10]  
**Table 3.** Response times of sensor at different temperatures [10]

Response	Response time (s)				
	-20°C	-10°C	0°C	20°C	40°C
T 60	6	Less than 5	Less than 5	Less than 5	Less than 5
T 90	52	30	18	12	9
T 95	112	60	36	21	12

**Таблица 4.** Перекрестная чувствительность к разным газам [10]  
**Table 4.** Cross sensitivities to other gases [10]

Тестирующий газ / Test gas	Относительная чувствительность (CO is 100) при 20°C / Relative sensitivity (CO is 100) at 20°C
СО	100
Водород / Hydrogen	30
Метан / Methane	0
Изобутан / Iso-Butane	0
Углекислый газ / Carbon dioxide	0
Сероуглерод / Carbon di-sulfate	0
Сероводород / Hydrogen sulfide	0
Оксид азота / Nitrogen oxide	0
Диоксид азота / Nitrogen dioxide	< 5
Аммиак / Ammonia	0 ***
Этилацетат / Ethyl acetate	0 ***
Дихлорметан / Di-chloromethane	0 ***
Гептан / Heptane	0 ***
Толуол / Toluene	0 ***
Изопропиловый спирт / IPA	0 ***
Этиловый спирт / Ethanol	< 2 *
Гексаметилдисилоксан / Hexa-methyl di-siloxan	0 **

Время воздействия: \* 30 минут, \*\* 40 минут, \*\*\* 2 часа.  
 Exposure time: \* 30 minutes \*\* 40 minutes \*\*\* 2 hours.

#### 4.1. Рекомендуемое основное схемное решение

Приведенная ниже схема использует операционный усилитель ОР97, легко доступный и имеющий малую мощность. Температурная зависимость NAR-508 компенсируется NTC термистором, имеющим константу  $\beta = 3435\text{K}$ , изготовленным Ishizuka Denshi. Таким образом, полученная точность может быть в пределах  $\pm 10\%$  в диапазоне от  $-10^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$ . Также может быть

использован и любой другой термистор с  $\beta$ -константой  $3500\text{K}$  и значением сопротивления (R25)  $10\text{ k}\Omega$ .

Температурная компенсация, приведенная в этой схеме, относится только к чувствительности. Смещение нуля от температуры не компенсируется в этом случае, но может применяться другой термистор, сложная терморезисторная матрица или компенсация программным обеспечением.



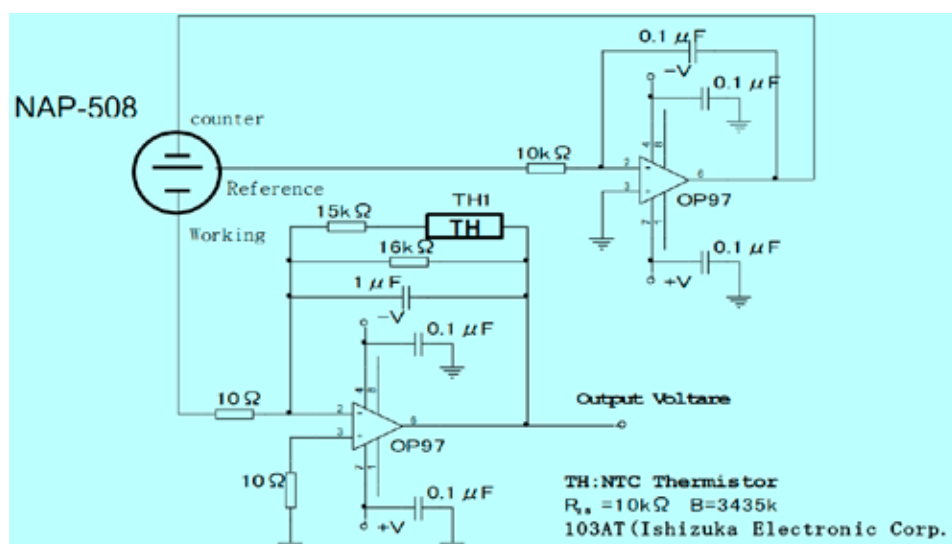


Рис. 7. Рекомендуемое схемное решение [10]

Fig. 7. Basic operational circuit [10]



Рис. 8. Внешний вид автономного газосигнализатора CO ACO-10 (ПП «АРТОН») на основе датчика NAP-508.

Fig. 8. View of the CO off-line detector ACO-10 (from PP "Arton") on basis sensor NAP-508.

## 5. Электрохимические металл-оксидные датчики для анализа CO

### 5.1. Популярное объяснение принципа работы датчика

В чистом воздухе, донорные электроны в диоксиде олова притягиваются кислородом, который

адсорбируется на поверхности чувствительного материала, предотвращая электрический ток.



Рис. 9. Популярная демонстрация принципа работы металл-оксидного датчика [11]

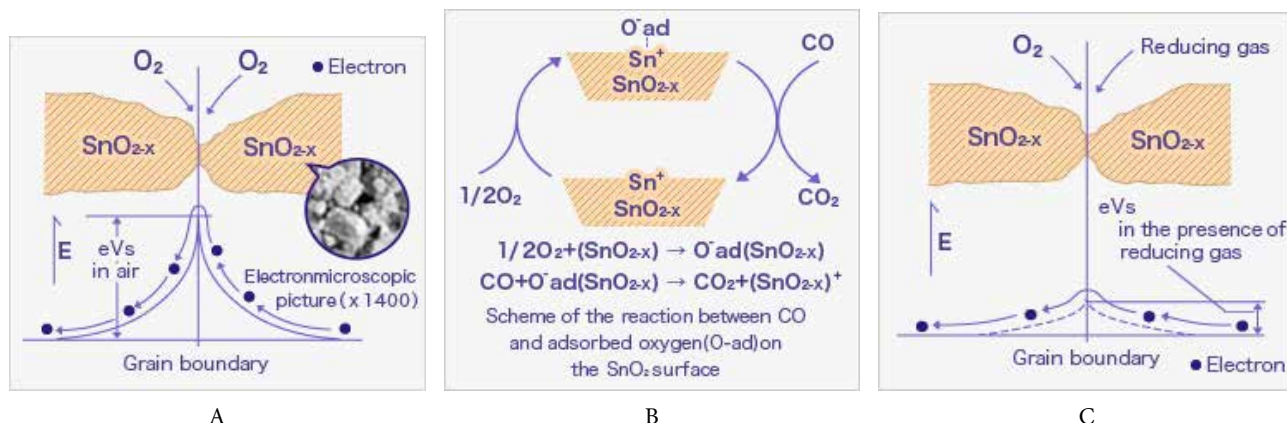
Fig. 9. The popular demonstration of the operating principle of a metal-oxide sensor [11]

В присутствии восстанавливающих газов, поверхностная плотность адсорбированного кислорода уменьшается, так как он реагирует с восстановительными газами. Электроны затем поступают в диоксид олова, позволяя току свободно протекать через датчик (кликните на ссылку для просмотра процесса в динамике).

**5.2. Принцип действия**

В случае, когда чувствительный слой материала датчика (как правило, диоксид олова [SnO<sub>2-x</sub>]) нагревают до высокой температуры, такой как 400°C,

и в случае отсутствия кислорода, электроны текут через контактирующие части (по границам зерен) кристалла диоксида олова. В чистом воздухе (около 21% O<sub>2</sub>), кислород адсорбируется на поверхности оксида металла. Благодаря высокому сродству к электронам, адсорбированный кислород притягивает свободные электроны внутри оксида металла, образуя потенциальный барьер на границах зерен. Это потенциальный барьер препятствует потоку электронов, в результате чего наблюдается большое сопротивление датчика в чистом воздухе (см. рис. 10A).

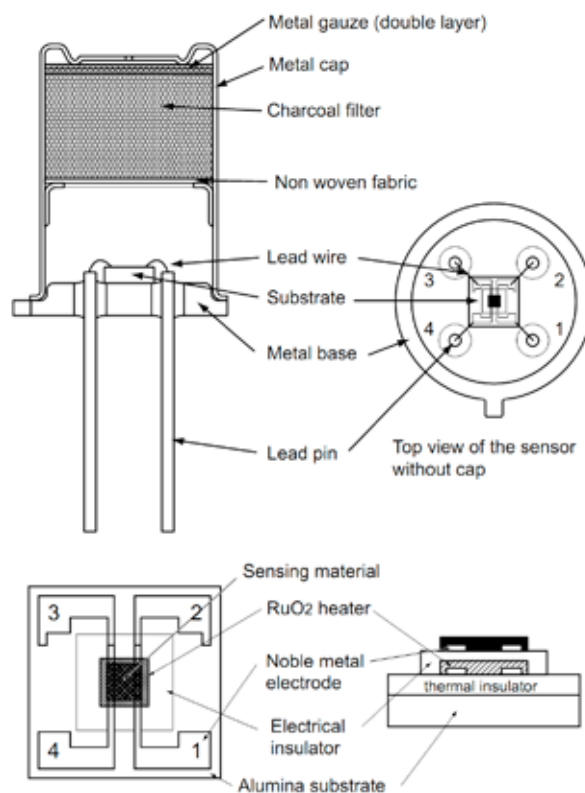


**Рис. 10.** Принцип работы металл-оксидного датчика [11]  
**Fig.10.** The explanation of the operating principle of a metal oxide sensor [11]

Когда на датчик воздействует горючий или восстановительный газ (например, оксид углерода), на поверхности диоксида олова происходит реакция окисления этого газа адсорбированным кислородом (см. Рис. 10B). В результате, плотность адсорбированного кислорода на поверхности диоксида олова уменьшается, уменьшается также и высота потенциального барьера (см. Рис. 10C). Тогда электроны легко проходят через потенциальный барьер с уменьшенной высотой и сопротивление датчика уменьшается. Анализируемый газ в воздухе может быть обнаружен путем измерения изменения сопротивления газового датчика. Результат химической реакции газов и адсорбированного кислорода на поверхности диоксида олова зависит от реакционной способности анализируемых газов и рабочей температуры датчика.

**5.3. Характеристики датчика для анализа CO TGS2442 фирмы Figaro (Япония)**

TGS2442 это новый тип толстопленочных металл-оксидных полупроводников, с трафаретной печатью, миниатюрный, с использованием импульсного нагрева для достижения низкого энергопотребления [12]. TGS2442 обладает высокой селективностью к окиси углерода вместе с уменьшенной зависимостью от влажности и хорошей долговечностью.



**Рис. 11.** Конструкция TGS2442 [12]  
**Fig. 11.** Design of TGS2442 [12]

На рисунке 11 показана конструкция TGS2442. В датчике используется многослойная структура. Слой стекла для тепловой изоляции наносится между нагревателем на основе оксида рутения ( $\text{RuO}_2$ ) и подложки из оксида алюминия. Пара золотых электродов нагревателя наносится на теплоизолятор. Газочувствительный слой на основе диоксида олова ( $\text{SnO}_2$ ) наносится на электроизоляционный слой, который отделяет обогреватель. Пара Pt электродов для чувствительного слоя датчика наносится на электрический изолятор. Активированный угольный фильтр используется с целью уменьшения влияния мешающих газовых компонентов.

На рисунке 12 показана базовая измерительная схема TGS2442 [12]. Напряжение ( $V_C$ ) прикладывается к чувствительному слою, который имеет сопротивление ( $R_s$ ) между двумя электродами датчика (контакты 2 и 3)

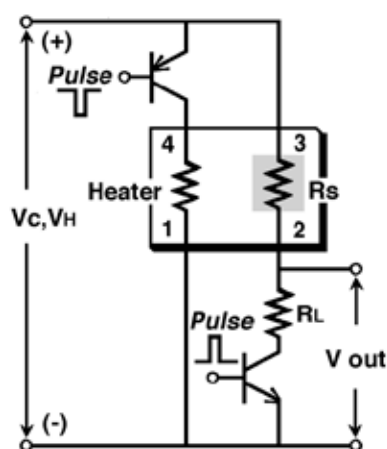


Рис. 12. Электрическая схема [12]  
Fig. 12. Basic operational circuit [12]

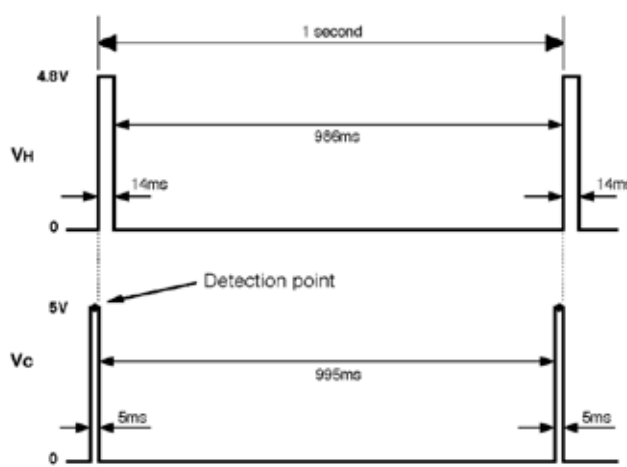


Рис. 13. Циклы нагревателя и схемы измерения [12]  
Fig. 13. The cycles of heater and measurement circuit [12]

Таблица 5. Основные технические характеристики металл-оксидного датчика TGS2442 [12]

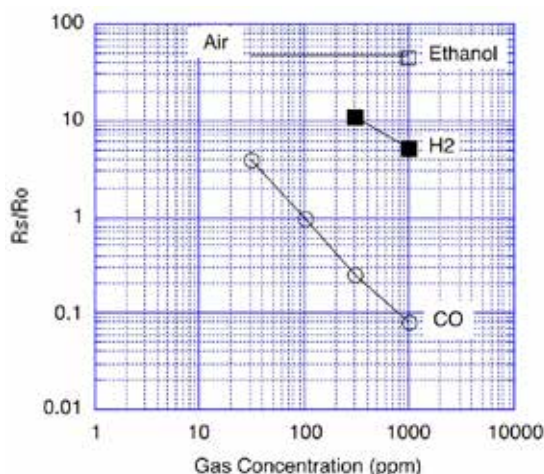
Параметр		Значение	
Номер модели		TGS 2442	
Тип чувствительного элемента		M1	
Корпус		ТО-5 металлический	
Детектируемый газ		Монооксид углерода	
Рабочий диапазон чувствительности		30 ~ 1000 ppm	
Стандартные условия цепи	Напряжение нагревателя в цикле прогрева	$V_H$	$V_{HH} = 4.8V \pm 0.2V$ DC, 14ms, $V_{HL} = 0.0$ , 986 ms
	Напряжение в измерительной цепи	$V_C$	$V_C = 0V$ на протяжении 995ms, $V_C = 5.0V \pm 0.2V$ DC на протяжении 5ms
	Сопротивление нагрузки	$R_L$	изменяется ( $\geq 10$ k $\Omega$ )
Электрические характеристики при стандартных условиях	Сопротивление нагревателя	$R_H$	$17 \pm 2.5\Omega$ при комнатной температуре
	Ток нагревателя	$I_H$	Примерно 203 mA (при $V_{HH}$ )
	Мощность, потребляемая нагревателем	$P_H$	примерно 14mW (среднее значение)
	Сопротивление сенсора	$R_S$	13.3k $\Omega$ ~ 133k $\Omega$ в 100ppm монооксида углерода
Стандартные условия испытаний	Чувствительность (изменение соотношения $R_s$ )	$\beta$	0.13 ~ 0.31
	Условия испытаний газа	Монооксид углерода в воздухе при $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , $65 \pm 5\%RH$	
	Условия электрической цепи	Стандартные условия цепи (см. выше)	
	Время выдержки перед тестом	2 дня и более	

**Table 5.** Main technical characteristics of the metal-oxide sensor TGS2442 [12]

Specifications			Value
Model number			TGS 2442
Sensing element type			M1
Standard package			TO-5 metal can
Target gases			Carbon monoxide
Typical detection range			30 ~ 1000 ppm
Standard circuit conditions	Heater voltage cycle	$V_H$	VHH = 4.8V $\pm$ 0.2V DC, 14ms VHL = 0.0, 986 ms
	Circuit voltage cycle V	$V_C$	VC = 0V for 995 ms, VC = 5.0V $\pm$ 0.2V DC for 5 ms
	Load resistance	$R_L$	variable ( $\geq$ 10k $\Omega$ )
Electrical characteristics under standard test conditions	Heater resistance	$R_H$	17 $\pm$ 2.5 $\Omega$ at room temp
	Heater current	$I_H$	approx. 203 mA (in case of VHH)
	Heater power consumption	$P_H$	approx. 14 mW (ave.)
	Sensor resistance	$R_S$	13.3 k $\Omega$ ~ 133 k $\Omega$ in 100ppm of carbon monoxide
	Sensitivity (change ratio of $R_S$ )	$\beta$	0.13 ~ 0.31
Standard test conditions	Test gas conditions	Carbon monoxide in air at 20 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C, 65 $\pm$ 5%RH	
	Circuit conditions	Same as Std. Circuit Condition (above)	
	Conditioning period before test	2 days or more	

В таблице 5 приведены основные технические характеристики металл-оксидного датчика TGS2442. Тут чувствительность  $\beta = R_S(\text{CO}, 300 \text{ ppm})/R_S(\text{CO}, 100 \text{ ppm})$ ,

де  $R_S$  – сопротивление датчика при заданной концентрации CO.

**Рис. 14.** Относительная чувствительность датчика к различным газам [12]**Fig. 14.** The relative sensitivity of the sensor to various gases [12]

На рис. 14 показана относительная чувствительность датчика к различным газам. По оси Y отложено соотношение величины сопротивления датчика к различным газам ( $R_S$ ) к сопротивлению датчика при 100 ppm CO ( $R_0$ ). Как видно из рис. 14, TGS2442 демонстрирует очень хорошую чувствительность к CO, так как кривая сопротивления датчика CO резко падает при увеличении концентрации CO. Для сравнения, чувствительность к этанолу ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) является очень низкой, о чем свидетельствует относительно малый наклон кривой чувствительности и ее высокое значение сопротивления. Плохая чувствительность датчика также и к  $\text{H}_2$ . Что касается влияния сигаретного дыма на сопротивление датчика, то количество CO в сигаретном дыме эквивалентно примерно 20 ppm CO при 10 выкуренных сигаретах в комнате размером

примерно 24м<sup>3</sup>. Т.е. влияние сигаретного дыма является недостаточным для срабатывания бытового пожарного извещателя (ПИ) CO на основе TGS2442, если он откалиброван при концентрации 60 ppm CO, что обычно и делают.

Рисунок 15 показывает изменение сопротивления датчика после подачи на него питания. Перед проведением данного теста, датчик хранился в отключенном состоянии в обычном воздухе в течение 40 дней после чего на него было подано напряжение. После подачи напряжения, сопротивление датчика достигает 90% от его конечного значения менее чем за одну минуту. Поэтому ПИГ, использующие TGS2442, должны иметь схему задержки, чтобы предотвратить активацию сигнала тревоги в течение этого периода.

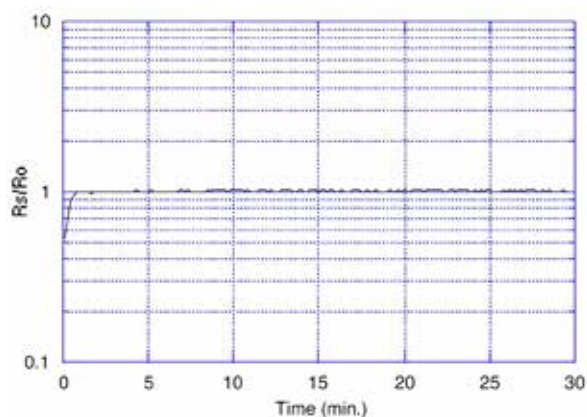


Рис. 15. Время прогрева датчика [12]  
Fig. 15. Warm-up time of the sensor [12]

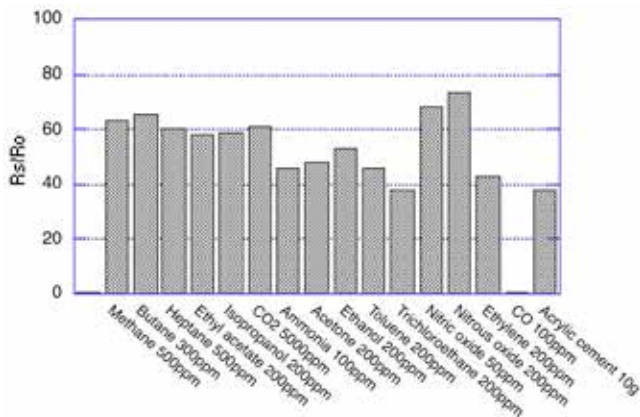


Рис. 16. Влияние мешающих компонентов [12]  
Fig. 16. Sensitivities to other gases [12]

На рисунке 16 показаны результаты тестирования датчика TGS2442 на устойчивость к воздействию различных мешающих газов, указанных в Протоколе 1 испытаний GRI. Тест был проведен путем внесения датчика в каждый газ, указанный на рис. 16 (начиная со 100 ppm CO) в течение двух часов, затем помещение датчика в чистый воздух на время один час, а затем установка датчика в следующий тестируемый газ. Эту процедуру повторяли для получения полного спектра газов, показанных на рис. 16. Поскольку датчик подвергается последовательно влиянию каждого

из тестируемых газов, в какой-то незначительной степени эффект предыдущего испытуемого газа может повлиять на последующие результаты испытаний в течение короткого периода времени. Тем не менее, несмотря на короткий период времени, эффекты от таких газов следует учитывать. Не смотря на это датчик по-прежнему демонстрирует значительно меньшую чувствительность к каждому из тестируемых газов по сравнению с 100 ppm CO и чувствительность к CO остается неизменной.

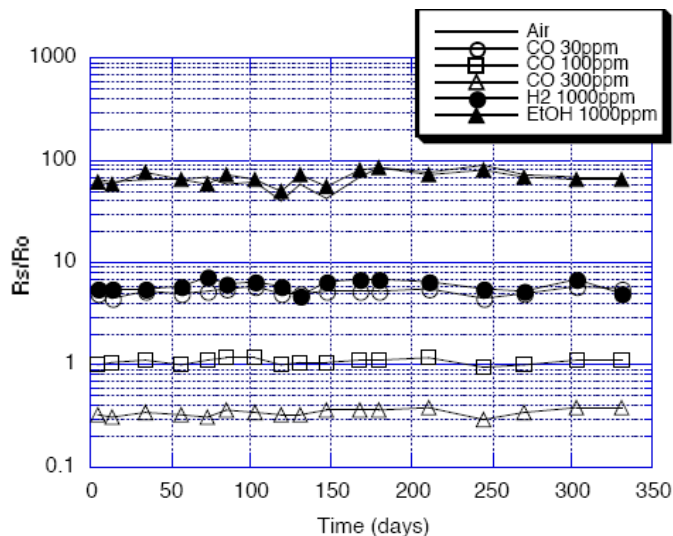


Рис. 17. Долговременная стабильность датчика [12]  
Fig.17. Long-term stability of the sensor [12]

Рисунок 17 показывает результаты испытаний на долговременную стабильность TGS2442. Тестируемые образцы находились с включенным питанием и при стандартных условиях питания и чистоте воздуха. Измерения проводились для подтверждения параметров датчиков в стандартных условиях испытаний (20°C, относительная влажность 65%) на протяжении 350 дней. Первоначальное значение относительного изменения сопротивления было измерено через четыре дня после подключения датчика к сети при обычном воздухе и номинальном напряжении и при воздействии мешающих газовых компонентов. По оси Y отложено

соотношение  $R_s/R_o$  между измеренной величиной сопротивления датчика и начальным значением (на 4 день) сопротивления при 100 ppm CO.

Чтобы продемонстрировать устойчивость TGS2442 против коррозии, образцы были подвергнуты условиям испытаний согласно UL2034, гл. 57 – Тест на коррозию. Датчик был поставлен на три недели в смесь из 100ppb  $H_2S$ , 20ppb  $Cl_2$ , и 200ppb  $NO_2$  и был обеспечен воздухообмен 5 раз в час. По сравнению с первоначальными значениями  $R_s/R_o$ , когда образцы не подвергались воздействию этих агрессивных газов, не было замечено значительной разницы в значениях  $R_s/R_o$  (см. рис. 18).

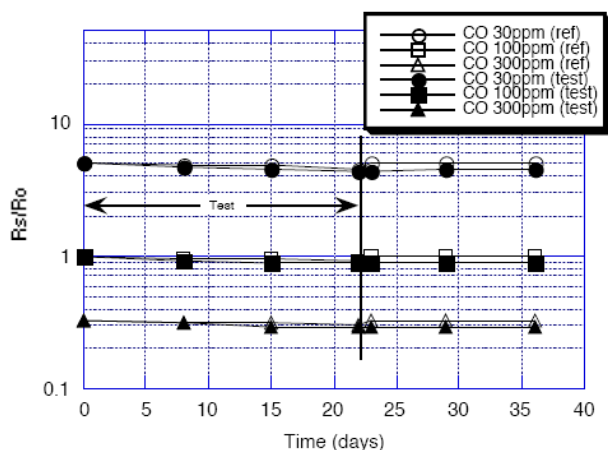


Рис. 18. Устойчивость к коррозии [12]

Fig. 18. Corrosion resistance [12]

Рисунок 19 показывает сравнение сигналов опорных датчиков с теми, что подвергались воздействию воздуха при 52°C и 95% относительной влажности в течение 168 часов, далее выдерживались при нормальных условиях в течение 2 дней, затем следующий цикл на протяжении 168 часов при 20°C и 10% относительной влажности (RH). Испытания проводились

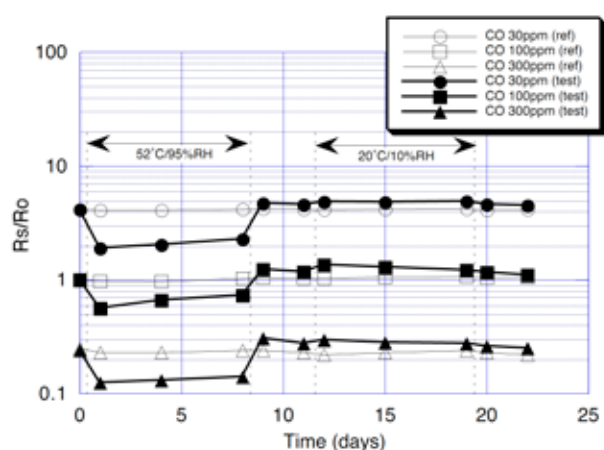


Рис. 19. Испытания на влажность [12]

Fig. 19. Influence of humidity [12]

на датчиках подключенным к питанию в соответствии с тестом на влажность UL2034 п. 46A.1. Как показывают испытания (см. рис. 19) датчики подвержены незначительному воздействию влаги, однако они быстро возвращаются в свое исходное состояния после прекращения воздействия.



Рис. 20. Внешний вид пожарного извещателя ПП «Анализер» с использованием датчика TGS2442: 1 – светодиод;

2 – крышка с прорезями; 3 – металлическая сетка

Fig. 20. Appearance of the fire detector PP “Analyzer” with the sensor TGS2442: 1 – LED; 2 – Cover with slots; 3 – Wire mesh;

## 6. Подведение итогов

Анализируя результаты тестирования датчиков NAP-508 и TGS2442 можно утверждать, что на базе этих датчиков могут быть созданы ПИГ с хорошими параметрами. Среди преимуществ NAP-508 более высокая селективность, независимость от влажности, отсутствие энергопотребления. К недостаткам датчика следует отнести присутствие в его составе кислотного электролита, ограниченность рабочего диапазона температур 50°C, влияние скачков давления, небольшой срок сохраняемости, длительный период выхода на режим после хранения. В тоже время, датчик

TGS2442 обладает более высокими эксплуатационными характеристиками (большой срок сохраняемости, более широкий температурный диапазон, меньшие габариты и вес, отсутствие агрессивной активной среды). Однако энергопотребление датчика достаточно большое – 14 мВт. Это основной недостаток датчика.

Однако фирма Figaro и другие производители металл-оксидных датчиков постоянно совершенствуют технологию изготовления датчиков, применяют микро и нанотехнологии. Так серия датчиков TGS 8100 отличается миниатюрными размерами, а серия TGS 8410 мизерным энергопотреблением – 0,087 мВт.

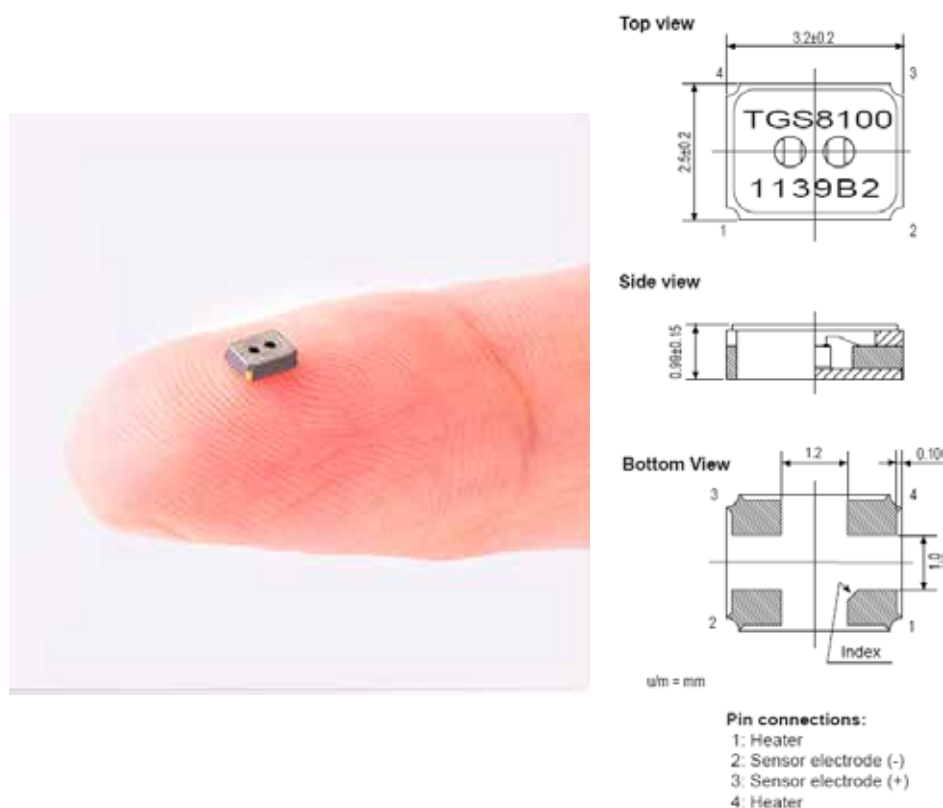


Рис. 21. Миниатюрный датчик TGS 8100 [13]

Fig. 21. Microminiature sensor TGS 8100 [13]

## 7. Выводы

Тенденция (применения нанотехнологий при изготовлении датчиков) дает уверенность, что проблема энергопотребления металл-оксидных датчиков будет решена. В этом случае эти датчики будут вне конкуренции при создании ПИГ или канала CO в мульти-сенсорном ПИ. К сожалению, в настоящее время не все производители могут себе позволить использовать нанотехнологии при изготовлении датчиков. Они достаточно дорогие и могут себя окупить при миллионных тиражах. Один лазерный пинцет (работает на

принципе энергетической ямы в трехмерной стоячей волне и перемещение ее положения достигается за счет перестройки частоты лазера) стоит несусветно дорого. Кроме того, иногда присутствуют коммерческие соображения. Скажем, фирма Figaro в последнее время развивает выпуск электролитических датчиков, в том числе и датчиков CO. Получены хорошие результаты. То есть создание металл-оксидного датчика CO с мизерным энергопотреблением создало бы конкуренцию этому направлению. К сожалению, другие фирмы – производители металл-оксидных датчиков – не имеют таких технологических возможностей как Figaro.

## Литература

- [1] BS EN 54-26:2015 Fire detection and fire alarm systems. – Part 26: Carbon monoxide detectors. Point detectors
- [2] BS EN 54-30:2015 Fire detection and fire alarm systems. – Part 30: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors.
- [3] BS EN 54-31:2014 Fire detection and fire alarm system. – Part 31: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors.
- [4] ISO 7240-6:2011 Fire detection and alarm systems – Part 6: Carbon monoxide fire detectors using electro-chemical cells.
- [5] ISO 7240-8:2014 Fire detection and alarm systems – Part 8: Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor.
- [6] ISO 7240-27:2009 Fire detection and alarm systems – Part 27: Point-type fire detectors using a scattered-light, transmitted-light or ionization smoke sensor, an electrochemical-cell carbon-monoxide sensor and a heat sensor.
- [7] Jacob Fraden Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications. Fourth Edition. Springer New York, 2010, p. 663.
- [8] Chemical Sensors: Comprehensive Sensors Technologies. Volume 5: Electrochemical and Optical Sensors. Momentum Press, LLC, 2011, p. 518.
- [9] LPS 1282: Issue 1.0 Requirements and Testing Procedures for Combined Domestic Smoke and Carbon Monoxide Detectors.

- [10] Low-Cost Electrochemical Toxic Gas Sensors for Residential and Light Commercial Applications <http://www.nemoto.eu/restox.html> [accessed: 20.11.2015].
- [11] Operating principle. MOS-type gas sensors <http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/principle/mos-type.html> [accessed: 20.11.2015].
- [12] TGS2442 Data sheet <http://www.figaro.co.jp/en/topic/2007/07/updated-data-sheet-of-tgs2442.html> [accessed: 20.11.2015].
- [13] Figaro official website: TGS8100 <http://www.figaro.co.jp/en/product/feature/tgs8100.html> [accessed: 20.11.2015].

## Аббревиатуры

СО – угарный газ, монооксид углерода;  
ПИГ – пожарный извещатель газовый.

\* \* \*

**Козубовский Владимир** получил первую докторскую степень (кандидат физ.-мат. наук) в Институте физики АН Украины в 1976 году и вторую докторскую степень (доктор технических наук) в Московском институте химического машиностроения в 1991 г. В течение многих лет работал в Специальном КБ аналитического приборостроения. Был руководителем более 40 разработок приборов газового анализа. Имеет более 100 публикаций, 50 патентов по приборам газового анализа, оптическим и полупроводниковым газовым сенсорам. В 1998 получил Государственную премию Украины в области науки и техники. В настоящее время работает в Ужгородском национальном университете профессором кафедры технологии машиностроения, консультантом по техническим вопросам ЧП «Анализер».

**Мисевич Игорь** закончил в 1980 году черновицкий государственный университет по специальности «физика полупроводников», после чего работал инженером ЦКБ «КВАРЦ», за этот период получил более 15 патентов на изобретение. С 1998 года – основатель и генеральный директор ЧП «АРТОН». Имеет более 60 патентов, автор более 15 научных статей.

**Иванчук Михаил** получил ученую степень (кандидат технических наук) в Национальном университете «Львовская политехника» в 2011 году. Работал ассистентом кафедры «Радиотехники и информационной безопасности» Черновицкого национального университета на протяжении 10 лет, 5 лет был руководителем студенческого конструкторского бюро «АЛЕФ». Сочетатель 4 патентов и более 30 публикаций. В настоящее время работает инженером-конструктором на частном предприятии «АРТОН», а также по совместительству на должности доцента кафедры «Программной инженерии» университета «КРОК».