

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 06.08.2024  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eab0f73e943df4a4851fda56d089

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и средств связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 5 » 03



## СЕНСОРЫ И ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Методические указания к практическим занятиям

УДК 621.382

Составители Е. О. Брежнева, О.Г. Бондарь

Рецензент

Доктор технических наук, профессор Чернецкая И. Е.

**Сенсоры и датчики физических величин:** методические указания к практическим занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Е.О. Брежнева, О.Г. Бондарь. Курск, 2024. - 45 с.

Приведены задания для практических занятий.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальностям автоматике и электроники (УМО АЭ).

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 5.03. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 2,62. Уч.- изд. л. 2,37. Тираж 100 экз. Заказ 146 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

**СОДЕРЖАНИЕ**

Цель и задачи практических занятий.....	4
Необходимые материально-техническое оборудование и материалы.....	4
Основные теоретические положения.....	5
1. Практическая работа №1 «Выбор датчиков при проектировании газоанализатора» .....	32
2. Практическая работа №2 «Анализ и обработка информации при построении модели датчика».....	37
3. Практическая работа №3 «Моделирование характеристики преобразования датчика».....	40
4. Практическая работа №4 «Исследование и оптимизация модели датчика».....	43

## **Цель и задачи практических занятий**

**Целью** практических занятий является изучение устройства, принципов работы, схем включения датчиков, а также получение навыков обработки информации, моделирования, аппроксимации характеристик и оптимизации моделей датчиков.

### **Задачи практических занятий:**

- познакомится с принципами работы, схемами включения датчиков, а также назначением и техническими характеристиками приборов на их основе;
- изучить методы и средства сбора и обработки информации;
- получить навыки моделирования характеристик датчиков с использованием математических прикладных пакетов.

### **Необходимые материально-техническое оборудование и материалы**

1. Microsoft Windows Professional 7 Russian (Upgrade Academic OPEN1 License No Level № 60803556 - 13 копий);
2. LibreOffice (LGPL v3);
3. Антивирус Касперского (или ESETNOD);
4. ПК (Processor i5-2500, RAM DDR3 4 GB, HDD 320 GB, DVD RW, TFT-монитор 24” 1920x1080);
5. MatLab R2012b (лицензия №820456) – пакет прикладных программ.

## Основные теоретические положения

### Газоанализаторы

Параметры и характеристики газоанализаторов в основном определяются типом, применяемых в них газочувствительных датчиков.

Структура многокомпонентного газоанализатора представляет собой: блок пробоотбора (БПО) и пробоподготовки (БПП), предназначенные для отбора и подготовки проб контролируемой газовой среды; блок питания (БП), обеспечивающий все блоки и модули необходимым напряжением; модули датчиков (МД), в которые входят первичные преобразователи и схемы обеспечения их функционирования; блок обработки информации (БОИ), предназначенный для автоматической обработки выходных сигналов модулей датчиков; блок индикации и сигнализации (БИиС), обеспечивающий цифровую индикацию значений концентрации каждого контролируемого газа и формирующий тревожную звуковую и световую сигнализацию о достижении заданных уровней ПДК (предельно допустимая концентрация) или НКПР (нижний концентрационный предел распространения пламени) конкретных заданных компонентов.

Основными производителями многокомпонентных газоанализаторов в России являются НПО «Химавтоматика» (Москва), ПО «Аналитприбор» (Смоленск), ФГУП «НПП «Дельта» (Москва), ЗАО «ОПТЭК» (Санкт-Петербург), ЗАО «ЭКСИС» (Москва). Среди выпускаемых многокомпонентных газоанализаторов можно выделить КАСКАД-Н, АДГ-305, АНКАТ-7664М, «СЕНСИС-009», МАГ-6П, ГАЗОТЕСТ и другие.

Основными зарубежными производителями многокомпонентных газоанализаторов являются *Servomex* (Великобритания), *Dräger* (Германия), *Riken* (Япония), *Siemens* (Германия), *BW Technologies* (Канада) и другие. Из зарубежных моделей многокомпонентных газоанализаторов можно отметить газоанализатор *GX-2001* японской фирмы *Riken*, *ALTAIR 4* производитель *MSA AUER* (Германия), *ServoPro 4100* (*Servomex*), *ULTRAMAT23* (*Siemens*), *CLIR 2M*

(*Environnement S.A.*), *Multimax (BW Technologies)*, *Dräger X-am 7000* производства компания *Dräger* (Германия) и другие. Основные технические характеристики отечественных и зарубежных многокомпонентных газоанализаторов представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Пределы основной допускаемой погрешности многокомпонентного газоанализатора АНКАТ-7664М

Детектируемый газ	Предел измерения	Участок диапазона измерения, в котором нормируется абсолютная погрешность и вариация показаний	Предел основной абсолютной погрешности
<i>CO</i>	0-50 мг/м <sup>3</sup> (0-100 мг/м <sup>3</sup> )	0-20 мг/м <sup>3</sup>	±5 мг/м <sup>3</sup>
		20-50 мг/м <sup>3</sup>	±5+0,25( <i>C<sub>X</sub></i> -20) мг/м <sup>3</sup>
	0-200 мг/м <sup>3</sup> (0-350 мг/м <sup>3</sup> )	0-20 мг/м <sup>3</sup>	±5 мг/м <sup>3</sup>
		20-200 мг/м <sup>3</sup>	±5+0,25( <i>C<sub>BX</sub></i> -20) мг/м <sup>3</sup>
<i>CO<sub>2</sub></i>	0 – 2,0 % об. (0–5,0 % об.) 0 – 5,0 % об. (0–7,0 % об.) 0 – 10,0 % об. (0–20,0 % об.)	Во всем диапазоне	±5 % (приведенная погрешность)
<i>Ex</i>	0-50 % НКПР (0-99 % НКПР)	Во всем диапазоне	±5 % НКПР
<i>CH<sub>4</sub></i>	0-99 % НКПР (0-100 % НКПР) 0 – 4,40 % об. (0–4,40 % об.)	Во всем диапазоне	±5 % НКПР  ±0,025 % об.
$\Sigma CH$	0-99 % НКПР (0-100 % НКПР)	Во всем диапазоне	±5 % НКПР
<i>SO<sub>2</sub></i>	0-20 мг/м <sup>3</sup> (0-40) мг/м <sup>3</sup>	0-10 мг/м <sup>3</sup>	±2,5 мг/м <sup>3</sup>
		10-20 мг/м <sup>3</sup>	±2,5+0,25( <i>C<sub>X</sub></i> -10) мг/м <sup>3</sup>
<i>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></i>	0 – 1,0 % об. (0 – 1,0 % об.)	Во всем диапазоне	± 0,05 % об. доли
<i>H<sub>2</sub>S</i>	0-20 мг/м <sup>3</sup> (0-40) мг/м <sup>3</sup>	0-3 мг/м <sup>3</sup>	± 0,7 мг/м <sup>3</sup>
		3-20 мг/м <sup>3</sup>	±0,7+0,25( <i>C<sub>BX</sub></i> -3) мг/м <sup>3</sup>
	0-40 мг/м <sup>3</sup> (0-100) мг/м <sup>3</sup>	0-10 мг/м <sup>3</sup>	±2,5 мг/м <sup>3</sup>
		10-40 мг/м <sup>3</sup>	±2,5+0,25( <i>C<sub>BX</sub></i> -10) мг/м <sup>3</sup>
<i>NO<sub>2</sub></i>	0-10 мг/м <sup>3</sup> (0-20) мг/м <sup>3</sup>	0-2 мг/м <sup>3</sup>	±0,5 мг/м <sup>3</sup>
		2-10 мг/м <sup>3</sup>	±0,5+0,25( <i>C<sub>X</sub></i> -2) мг/м <sup>3</sup>
<i>O<sub>2</sub></i>	0-23 % об. (0-30 % об.) 0-30 % об. (0-45 % об.)	Во всем диапазоне	±0,9 % об.

Таблица 2 – Основные характеристики многокомпонентного газоанализатора *GX-2001*

Газ	$CH_4$	$O_2$	$CO$	$H_2S$
Диапазон измерения	0-100 % об.	0-40 % об.	0-500 ppm	0-100 ppm
Разрешение	1 %	0,1 %	1 ppm	0,5 ppm
Погрешность (основная относительная)	±10 %	±5 %	±15 %	±15 %
Метод отбора	Диффузионный			
Специальные функции	Ручное включение подсветки дисплея (автоматическое при срабатывании сигнализации), непрерывная индикация текущего времени, автокалибровка, встроенное зарядное устройство			
Рабочая температура	- 20...+40 <sup>0</sup> С			
Питание	<i>Ni-Cd</i> элементы			
Габариты/масса	56×72×27 мм / 170 г			

Таблица 3 – Пределы основной и дополнительной допускаемых погрешностей многокомпонентного газоанализатора *Drager X-am 7000*

Детектируемый газ	Предел измерения	Пределы основной допускаемой погрешности	Пределы дополнительной допускаемой погрешности, в долях от основной погрешности		
			T, на каждые 10 <sup>0</sup> С	P, на каждые 3,3кПа	RH, на каждые 10%
$H_2$	0-500 ppm	±15 % (приведенная)	0,5	0,2	0,1
	500-2000 ppm	±15 % (относительная)			
$CO_2$	0-1 об. %	±15 % (приведенная)	0,5	0,2	0,1
	1-5 об. %	±15 % (относительная)			
$CO$	0-20 ppm	±15 % (приведенная)	0,5	0,2	0,1
	20-2000 ppm	±15 % (относительная)			
$O_2$	0-5 об. %	±5 % (приведенная)	0,5	0,2	0,1
	5-25 об. %	±5 % (относительная)			

В таблице 4 представлены значения основной допускаемой погрешности определения концентраций газов промышленными отечественными и зарубежными многокомпонентными газоанализаторами, полученные на основании анализа их технической документации.

Таблица 4 – Значения пределов основной допускаемой погрешности отечественных и зарубежных многокомпонентных газоанализаторов

Определяемый компонент	Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности отечественных газоанализаторов	Пределы допускаемой основной погрешности зарубежных газоанализаторов
O <sub>2</sub>	0 - 30,0 об. % 0 - 100,0 об. %	± 0,4 – 0,9 об. % (абс.) ± 1,0 об. % (абс.)	± 5 (отн.) -
CO	0 - 20 мг/м <sup>3</sup> Св. 20 - 1500 мг/м <sup>3</sup>	± 4 мг/м <sup>3</sup> (абс.) ± 10-25 % (отн.)	- ± 15 (отн.)
H <sub>2</sub>	0,05 – 2 об. % 0-3 об. %	- ±4 % (привед.)	± 0,2 об. % (абс.) -
CO <sub>2</sub>	0 - 1,0 об. % 0 - 10,0 об. %	±5 % (отн.) ±10 % (отн.)	- ± 15 (отн.)
NH <sub>3</sub>	20 – 200 ppm 20-600 мг/м <sup>3</sup>	- ±5 мг/м <sup>3</sup> (абс.)	±15 (отн.) -
Cl <sub>2</sub>	0-25 мг/м <sup>3</sup>	±0,25 мг/м <sup>3</sup> (абс.)	± 20 (отн.)
CH <sub>4</sub>	0 - 2,0 об. % Св. 2,0 - 5,0 об. %	± 0,2 об. % (абс.) ± 10 % (отн.)	± 5% (отн.) ± 10 % отн.

Изменение внешних условий (температуры, влажности, давления, появление в контролируемой среде мешающих газов) приводит к увеличению погрешностей измерения детектируемого газа и нормируется производителем как дополнительная погрешность. Дополнительная погрешность определяется в долях предела основной допускаемой погрешности  $\gamma$  и зависит от типа применяемых газочувствительных датчиков (таблица 5).

Дополнительные погрешности от влияния неизмеряемых компонентов нормируются в долях от предела допускаемой основной погрешности и составляют в среднем 1 - 1,5. При этом производитель нормирует пределы концентраций неизмеряемых компонентов



(1-20% от диапазона измеряемого компонента), при которых допускаемая погрешность не превысит приведенных значений.

Таблица 5 - Значения пределов допускаемой дополнительной погрешности

Тип датчика	Промышленные отечественные многокомпонентные газоанализаторы			Промышленные зарубежные многокомпонентные газоанализаторы		
	Т, на каждые 10 °С	Р, на каждые 3,3кПа	РН, на каждые 10%	Т, на каждые 10 °С	Р, на каждые 3,3кПа	РН, на каждые 10%
Электрохимический	0,5	0,2-0,7	0,2-0,5	0,5	0,2	0,1
Оптический	0,5	0,7	0,1	0,3	0,3	0,09
Каталитический	0,2	0,2-0,5	0,2	0,3	0,2	0,1

Таким образом, в настоящее время российской и зарубежной промышленностью выпускаются многокомпонентные газоанализаторы, совмещающие два и более методов измерения. Примерами могут служить газоанализатор АНКАТ-7664М и АНКАТ-410, совмещающие электрохимический и оптико-абсорбционный методы, АКВТ, ИГС-03, СТГ-1, совмещающие электрохимический и термокatalитический методы, *Drager X-am 7000*, совмещающий электрохимический, термокatalитический и оптико-абсорбционный методы. Обзор характеристик выпускаемых промышленностью газоанализаторов показал, что основными источниками дополнительных погрешностей служат факторы окружающей среды (температура, влажность, давление, газовый состав анализируемой среды), а величина погрешности в основном определяется характеристиками используемых газочувствительных датчиков.

### Газочувствительные датчики

В настоящее время рынок газочувствительных датчиков представлен, в основном, полупроводниковыми, электрохимическими, оптическими и каталитическими датчиками. Основными их произ-

водителями являются фирмы *Figaro Engineering Inc.* (Япония), *Nemoto & Co. Ltd* (Япония), *Applied Sensor* (Великобритания), *City Technology* (Великобритания), *Alphasense* (Великобритания), *Dynament* (Великобритания), *Membrapor* (Швейцария), ООО «Дельта-С» (Россия) и ряд других [1-8].

**Полупроводниковые газочувствительные датчики.** Они представлены полупроводниковыми металлоксидными датчиками (*Figaro Engineering Inc*, *Applied Sensor*) и датчиками на основе полевых транзисторов (*Applied Sensor*). Полупроводниковые датчики используются для обнаружения и измерения концентраций в воздухе следующих газов: угарный газ, водород, аммиак, горючие газы, хлор, сероводород. Характеристики наиболее широко применяемых полупроводниковых датчиков приведены в таблице 6.

Анализ характеристик, выпускаемых промышленностью полупроводниковых датчиков, показывает, что полупроводниковые металлоксидные датчики имеют длительный срок службы, быстрый отклик, высокую чувствительность к малым концентрациям газов и низкую стоимость. Дрейф характеристик полупроводниковых датчиков не превышает 3 % в год.

Погрешность измерений концентрации газа колеблется в пределах 10-30%. Исключение составляют датчики производства *Applied Sensor* (7 %), но стоимость датчиков *Applied Sensor* значительно превышает стоимость датчиков других производителей. Стоимость и срок службы датчиков зарубежных производителей более привлекательны.

К недостаткам датчиков полупроводникового типа относятся: низкая селективность, высокая чувствительность к вариациям температуры и влажности окружающей среды.

**Низкая селективность** полупроводниковых датчиков обусловлена механизмами реакций, протекающих на их активной поверхности. В сущности, оксидные полупроводниковые датчики способны лишь определить наличие в газовой среде восстановителя или окислителя, так как при их воздействии на датчик его сопротивление либо увеличивается (при наличии окислителя), либо уменьшается (в присутствии восстановителя) пропорционально их концентрации.

Таблица 6 – Характеристики полупроводниковых датчиков

Характеристики	Датчик CO на основе оксида олова, TGS2442, Figaro	Датчик CO на основе оксида олова, AS-MLC, Applied Sensor	Датчик H <sub>2</sub> на основе МДП-транзисторов, HLS-440, Applied Sensor	Датчик CO на основе оксида олова MQ-7, HANWEI	Датчик H <sub>2</sub> на основе оксида олова, СГ-2110-A1, ООО Дельта-С	Датчик CH <sub>4</sub> на основе оксида олова GGS 3000 T, UST
Диапазон измерений, % об.	0,003... 0,1	0,00005... 0,05	0...4,4	0,002... 0,2	0,0001...2	0... 0,1
Условия эксплуатации: температура, °С влажность, %	-10...+50 10...90	-40...+120 0...95	-20... +50 0...95	-20...+50 0...95	-60... +100 0...98	-20...+50 0...95
Предел основной приведенной погрешности, %	-	-	±7	-	±30	±30
Относительная температурная погрешность, %/°С	2	-	-	1,5	-	-
Относительная погрешность от изменения влажности, %/% RH	0,7	-	-	0,8	-	-
Время отклика, с	секунды	секунды	< 2	-	<2	-
Срок службы, лет	>5	>5	>5	>5	>3	>5
Селективность	Чувствительность к метану, диоксиду углерода	Чувствительность к углеводородам	Не чувствителен к CH, H <sub>2</sub> S, N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O	Чувствительность к H <sub>2</sub> , CH, CH <sub>4</sub> , парам спирта	Чувствительность к углеводородам, оксиду углерода	Чувствительность к CO, H <sub>2</sub>
Долговременный дрейф характеристик, %/год	3	-	-	-	3	-
Цена, рублей	300	1600	-	300	600	-

Окислитель в воздухе присутствует всегда – это кислород. Следовательно, эти датчики реагируют на активность и концентрацию восстановителя. На рисунке 1 показаны примерные кривые чувствительности (в данном случае для датчика MQ-7 фирмы Hanwei), демонстрирующие сильную перекрестную чувствительность полупроводниковых датчиков.

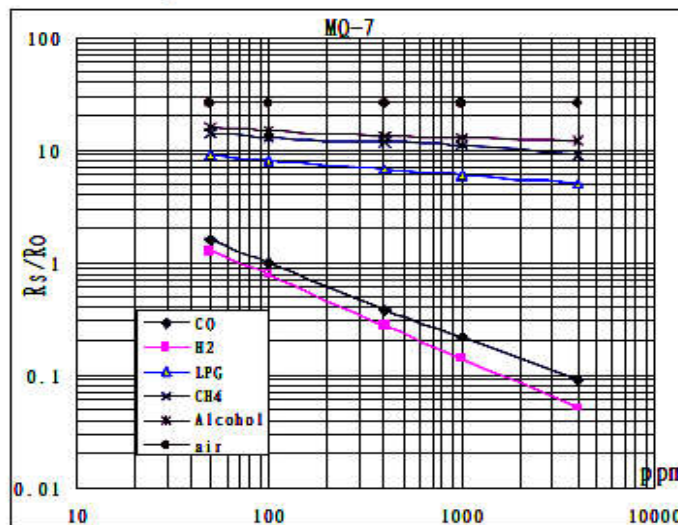


Рисунок 1 – Пример характеристик чувствительности датчика на основе оксида олова *MQ-7*: *LPG* – сжиженные углеводородные газы, *Alcohol* – пары спирта, *air* – воздух

По оси абсцисс представлена концентрация в логарифмическом масштабе, а по оси ординат отношение сопротивления сенсора при соответствующей концентрации газа в окружающей среде ( $R_s$ ) к его же сопротивлению, измеренному при концентрации угарного газа  $100 \text{ ppm}$  ( $R_o$ ). Для повышения селективности полупроводниковых датчиков используют следующие методы:

- 1) использование легирующих добавок, проявляющих свойства катализаторов;
- 2) выбор оптимальной рабочей температуры датчика, при которой чувствительность к определяемому газу максимальна, а к другим – минимальна;
- 3) подбор микроструктуры и состава основного материала, морфологических и геометрических характеристик чувствительного слоя и подложки;
- 4) использование молекулярных фильтров.

Наиболее селективными являются полупроводниковые датчики фирмы *Applied Sensor*, поскольку в них одновременно используются несколько методов повышения селективности.

**Влияние температуры.** Изменение рабочей температуры полупроводникового датчика вызывает изменение его электрического сопротивления, что связано, во-первых, с увеличением подвижности и скорости перемещения носителей зарядов, а, во-вторых, с из-

менением геометрических характеристик чувствительного слоя за счёт теплового расширения. При повышении температуры сопротивление датчика уменьшается, и выходной сигнал датчика ведёт себя так же, как при увеличении концентрации восстановителя. В среднем у датчиков фирмы *Figaro* изменение температуры на каждые  $10^{\circ}\text{C}$  вызывает изменение выходного сигнала на  $\pm 20\%$ .

Для снижения влияния вариаций температуры на сигнал датчика используется стабилизация рабочей температуры датчика. Для этого в датчик встраивается термочувствительный элемент, включаемый в автоматическое устройство стабилизации заданной рабочей температуры датчика, входящее в электронную схему датчика, и подогреватель (последний у металлооксидных датчиков всегда имеется, т.к. их рабочие температуры лежат в пределах от  $300$  до  $800^{\circ}\text{C}$ ).

**Электрохимические датчики.** Рынок электрохимических датчиков газа достаточно широк и представлен такими производителями как: *Figaro Engineering Inc*, *Nemoto & Co. Ltd*, *City Technology*, *Alphasense*, *Membrapor*, *International Technologies*, ООО «Аналитхимавтоматика» (Россия) и т.д [1, 9-12]. Промышленные электрохимические датчики выпускаются для обнаружения и контроля концентрации в воздухе следующих газов: кислорода, углекислого газа, сероводорода, аммиака, угарного газа, двуокиси азота и т.д.

О достижимых характеристиках электрохимических датчиков можно судить по таблице 7.

Из неё следует, что наилучшими характеристиками обладают датчики производителей *Nemoto* и *International Technologies*. Они имеют максимальный срок службы, незначительное влияние температуры и влажности, малое время отклика (*Nemoto*).

Практически все электрохимические датчики имеют незначительную перекрестную чувствительность, варьировать которую позволяет использование дополнительных методов повышения селективности. Так фирма *Membrapor* выпускает различные модели датчиков водорода, имеющих перекрестную чувствительность по отношению к угарному газу отличающуюся в 10 раз: *H2/S-1000* (20%) и *H2/SA-1000* (2%).

Таблица 7 – Основные характеристики электрохимических датчиков

Производитель	Датчик <i>H<sub>2</sub>S</i> <i>Sure-Cell</i> - <i>H<sub>2</sub>S</i> (H), <i>City</i> <i>Techno</i> <i>-logy</i>	Датчик <i>O<sub>2</sub></i> <i>O<sub>2</sub>-A1</i> , <i>Alpha</i> - <i>sense</i>	Датчик <i>H<sub>2</sub></i> <i>H<sub>2</sub>/S-</i> <i>1000</i> , <i>Mem</i> - <i>brapor</i>	Датчик <i>CO</i> <i>МФС-8</i> , <i>ООО</i> Ана- литхим- автома- тика	Датчик <i>CO</i> <i>NAP-5</i> <i>05</i> <i>Nemoto</i>	Датчик <i>O<sub>2</sub></i> <i>I-01</i> , <i>Intern</i> - <i>ational</i> <i>Techno</i> - <i>logies</i>	Датчик <i>CO<sub>2</sub></i> <i>TGS</i> <i>4160</i> , <i>Figaro</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
Диапазон измерений, %	0...0,01	0...3	0...0,1	0...0,4	0...0,1	0,5...35	0,035...5
Чувствительность, мкА/10 <sup>-4</sup> % об.	1,45±0,3	9,5±1,9	0,03±0,01	0,05±0,015	0,04±0,01	-	-
Предел основной приведенной погрешности, %	-	-	-	-	-	-	± 20
Срок службы, лет	2	1	2	> 3	> 5	6	-
Нелинейность выходного сигнала, %	<±5	<0.6	линейный	<5	-	± 0.5	-
Долгосрочный дрейф чувствительности, % от сигнала/год	<24	< 4	< 24	<12	<5	<24	-
Воспроизводимость показаний, % от сигнала	<±5	-	< 2	-	±2	-	-
Разрешение, % об.	-	-	0,0002	< 0,0001	0,00005	-	-
Дрейф нуля, % об.	<±0,00002	-	0,002	<±0,001	<±0,001	-	-
Время отклика, с	<30	<15	<45	<45	<30	<5	<120
Относительная температурная погрешность, % /°C	±0,4	±0,2	-	-	±0,12	±0,12	-

1	2	3	4	5	6	7	8
Относительная погрешность от изменения влажности, %/ % RH	-	< 0,7 (40°C)	-	-	Не чувствителен	0,03 (25°C) 0.055 (35°C)	0,05 (25°C)
Производитель	Датчик <i>H<sub>2</sub>S</i> <i>Sure-Cell</i> - <i>H<sub>2</sub>S</i> (H), <i>City</i> <i>Techno-logy</i>	Датчик <i>O<sub>2</sub></i> <i>O<sub>2</sub>-A1</i> , <i>Alpha-sense</i>	Датчик <i>H<sub>2</sub></i> <i>H<sub>2</sub>/S-</i> <i>1000</i> , <i>Mem-brapor</i>	Датчик <i>CO</i> <i>МФС-8</i> , <i>ООО</i> Ана- литхим- автома- тика	Датчик <i>CO</i> <i>NAF-5</i> <i>05</i> <i>Nemoto</i>	Датчик <i>O<sub>2</sub></i> <i>I-01</i> , <i>International</i> <i>Technologies</i>	Датчик <i>CO<sub>2</sub></i> <i>TGS</i> <i>4160</i> , <i>Figaro</i>
Перекрестная чувствительность, %	отсутствует	<i>CO<sub>2</sub></i> :<0.1	<i>CO</i> : <20	<i>CH<sub>4</sub></i> : <0,0005 <i>H<sub>2</sub></i> :<50	<i>H<sub>2</sub></i> :<30	<i>CO</i> : < 0,002; <i>CO<sub>2</sub></i> : < 0,002; <i>NO</i> : < 0,001; <i>H<sub>2</sub></i> : <2 <i>H<sub>2</sub>S</i> : <1	отсутствует
Цена, рублей	6000	3000	3000	3500	-	6200	1530

Основными достоинствами электрохимических датчиков являются более высокая селективность по сравнению с полупроводниковыми, а основными недостатками – длительное время отклика, небольшой срок службы, невысокая долговременная стабильность (дрейф чувствительности до 24% в год), относительно высокая стоимость.

**Высокая селективность** электрохимического датчика обеспечивается природой основной электродной химической реакции. Регулировать чувствительность и селективность датчиков, можно варьируя состав электролита, а также состав и структуру электродного материала. Помимо этого, используются следующие дополнительные методы повышения селективности этих датчиков:

1) использование молекулярных фильтров, пропускающих только молекулы определяемого газа;

2) использование замкнутого цикла реакций, когда образующиеся ионы и продукты реакции на одном электроде, используются в реакции, протекающей на другом электроде (*Nemoto & Co. Ltd*);

3) использование дополнительных электродов: четырехэлектродные датчики (*City Technology*) и электрод сравнения (*Nemoto & Co. Ltd*).

**Скорость отклика** электрохимических датчиков зависит от скорости диффузии газа в электрохимическую ячейку и скорости протекания реакций на электродах. Время отклика, определяемое диффузией газа через мембрану, зависит от свойств и структуры материала мембраны (что характеризуется коэффициентом проникновения молекул определяемого газа в материал мембраны), её толщины, механической конструкции мембраны и её геометрического расположения в устройстве. Основным способом увеличения скорости отклика электрохимических датчиков является увеличение скорости реакций на электродах, что зависит от степени их активности. Фирма *City Technology* использует высокоактивные электроды, что позволяет увеличить скорость отклика датчиков в сравнении с другими производителями.

**Малый срок службы и невысокая стабильность характеристик** электрохимических датчиков напрямую связаны с малым сроком службы самого электролита, возможностью его отравления оксидом свинца и углекислым газом, ограниченной способностью электролита растворять, образующийся на аноде оксид свинца, а также тем фактом, что для каждой восстановленной на катоде молекулы имеет место соответствующая окислительная реакция на аноде, которая и является причиной деградации анода и расхода электролита и, в свою очередь, приводит к появлению дрейфа выходного сигнала датчика. Поэтому срок службы датчика зависит от тока, массы анодного материала, эффективности его потребления, а также запаса активности вспомогательного электрода. Для увеличения срока службы применяют следующие методы:

1) использование электролита с более длительным сроком службы (многокомпонентного электролитического раствора кислоты) (*Figaro*);

2) увеличение размера анода (*City Technology*);

3) ограничение доступа кислорода в электрохимическую ячейку путём использования капилляров и мембран, что уменьшает окисление свинца на аноде (*City Technology*);

4) использование электродов с высоким запасом активности (*City Technology*);



5) совершенствование конструкции анода и химического состава анодного материала (*International Technologies*);

б) использование четырехэлектродной конструкции электрохимических датчиков, что позволяет снизить временной дрейф характеристик (*City Technology*).

**Влияние температуры.** Для большинства электрохимических датчиков изменение окружающей температуры на каждые 10°C приводит к изменению выходного сигнала в среднем на  $\pm 2\%$ . Для устранения влияния изменений температуры на показания электрохимических датчиков применяются устройства температурной стабилизации, для чего большинство датчиков имеют встроенный термочувствительный элемент (терморезистор). Снизить нежелательный эффект влияния температуры позволяет использование датчиков с четырьмя электродами (*City Technology*).

**Влияние давления.** Значительное влияние на работу многих электрохимических датчиков оказывает давление. При диффузионном способе отбора пробы оно обусловлено колебаниями атмосферного давления (или давления воздуха в закрытом помещении). При принудительном способе отбора пробы с помощью микронасоса – от стабильности работы этого микронасоса. В датчиках этого типа приходится минимизировать влияние случайных колебаний давления. В частности, в мембранных датчиках с принудительным отбором пробы используется дополнительная *PTFE* (политетрафторэтиленовая) мембрана для регулировки потока, которая снижает случайные колебания давления (*City Technology*). В некоторых случаях используется внешняя накопительная камера, усредняющая пульсации давления, вызываемые работой микронасоса.

**Влияние влажности.** Большинство электрохимических датчиков хорошо работают в условиях повышенной влажности, однако сильное снижение влажности оказывает отрицательный эффект на работу этих датчиков. Поэтому при работе датчиков в закрытых помещениях необходимо дополнительно контролировать влажность в помещениях и поддерживать её в допустимых пределах.

Наилучших результатов в области производства электрохимических датчиков удалось достичь для датчиков кислорода. Так срок службы датчиков кислорода составляет от 6 (*O<sub>2</sub>-Sensor International Technologies*) до 10 лет (датчик *Figaro KE-50*). Помимо этого, удалось значительно повысить скорость отклика датчиков (в частно-

сти, у датчика кислорода *International Technologies* время отклика составляет менее 5 секунд).

**Каталитические датчики.** Основными достоинствами каталитических датчиков являются: быстрота отклика, линейность сигнала вплоть до 60% НКПР (нижний концентрационный предел распространения пламени) и относительно низкая стоимость. К их недостаткам следует отнести низкую селективность, влияние температуры и влажности, возможность определять только горючие газы и невозможность применения датчика в анаэробных условиях (т.е. в отсутствии кислорода, что делает невозможным протекание реакции окисления).

В таблице 8 приведены характеристики датчиков горючих газов *Nemoto & Co. Ltd*, *City Technology* и НПФ «ИНКРАМ» (Россия) [1, 13-18].

Таблица 8 – Характеристики каталитических датчиков метана

Характеристики	Датчик NP-17, <i>Nemoto</i>	Датчик 4P-75C <i>CiTypeL</i> , <i>City Technology</i>	Датчик ГР1.0, НПФ «ИНКРАМ»
Диапазон измерений, % НКПР	0...100	0...100	0...50
Чувствительность, мВ /% $CH_4$ /воздух	20	24±4	-
Время отклика, с	8	<20	15
Предел допускаемой абсолютной погрешности, % НКПР ( $CH_4$ )	±1	-	±5
Долгосрочный дрейф чувствительности	<±0,5 % НКПР/месяц	<5 % сигнала/месяц	-
Долгосрочный дрейф нуля	<± 0,5 мВ/месяц	<5 % НКПР метана/месяц	-
Срок службы, лет	>5	3	> 1
Температурный дрейф нуля, % НКПР	< ± 2 (-20 - +70°C)	< ± 2 (-20 - +70°C)	±1 (-40 - +65 °C )
Цена, рублей	1600	-	8502

Схожие физические и химические свойства горючих газов, а также неселективность самой протекающей в датчике окислительной реакции, значительно усложняют процесс избирательного определения газов. Другим их недостатком является ингибирование и отравление катализатора, что и приводит к возникновению дрейфов нуля и чувствительности. Основным способом повышения се-

лективности и стабильности каталитических датчиков является выбор соответствующего каталитического материала. Иногда дополнительно используются специальные конструктивные решения, в частности, фильтры (*City Technology*), предотвращающие отравление и ингибирование катализатора.

Отрицательное влияние вариаций температуры, давления и влажности на показания датчика снижается за счёт применения систем стабилизации этих параметров (*City Technology, Nemoto*). В среднем при изменении температуры датчика на 10°C выходной сигнал датчика изменяется на  $\pm 2\%$ .

**Оптические газочувствительные датчики.** Основными производителями оптических газочувствительных датчиков являются фирмы *Dynament* и *City Technology* [1, 19-23].

Достоинствами оптических датчиков являются высокая чувствительность, селективность, точность, стабильность характеристик, хорошая воспроизводимость показаний, разнообразие контролируемых газов, нечувствительность к электромагнитным и радиационным полям и длительный срок службы. К недостаткам оптических датчиков следует отнести невысокую скорость отклика, нелинейность характеристик, достаточно высокую, хотя и избирательную чувствительность к световым помехам, влияние температуры и высокую стоимость.

Сравнительный анализ характеристик оптических датчиков *Dynament*, *City Technology* и *SmartGAS Mikrosensorik* (Германия) можно провести на примере датчиков углекислого и угарного газа. Их основные характеристики представлены в таблице 9.

Способность различных газов поглощать электромагнитное излучение определённых длин волн позволяет обеспечивать высокую селективность оптических датчиков. В основном они работают в инфракрасном диапазоне длин волн. Для обеспечения высокой селективности должны использоваться оптические фильтры, обеспечивающие пропускание характерных полос инфракрасного излучения. Так как принцип измерения оптических датчиков основан на поглощении молекулами газа инфракрасного излучения определённых длин волн, то с помощью оптических датчиков, возможно, детектировать углекислый газ, угарный газ, углеводороды, аммиак и т.д.

Таблица 9 – Основные характеристики оптических датчиков

Характеристики	Датчик $CO_2$ MSH-P-CO <sub>2</sub> /NC/TC, Dynament	Датчик CO SM – COM, SmartGAS Mikrosensorik	Датчик $CO_2$ IR-ceL®, City Technology
Измеряемый диапазон, %об.	0...5	0...2	0...5
Срок службы, лет	> 5	-	> 5
Минимальное разрешение, % от предела измерения	1	0,0001...0,01	0,15
Характеристики	Датчик $CO_2$ MSH-P-CO <sub>2</sub> /NC/TC, Dynament	Датчик CO SM – COM, SmartGAS Mikrosensorik	Датчик $CO_2$ IR-ceL®, City Technology
Погрешность	-	<±2 % от предела измерения	В диапазоне ±(0,1 % об. CO <sub>2</sub> + 4 % от концентрации) (- 20 °C - +50 °C)
Температурная зависимость нуля, % от предела измерения/°C	-	<±0,01	-
Время отклика, с	< 30	<30	< 35
Долгосрочный дрейф нуля за месяц	<0,005 % об.	<0,17% от предела измерения (0.003 % об.)	± 0,008 % об.
Воспроизводимость нуля, % об.	<± 0,005	-	±0,003
Воспроизводимость 5% CO <sub>2</sub>	<±0,005 % об.	<±2 % от предела измерения (0,04 %об.)	± 0,075 % об.
Цена, рублей	9000	13000	-

Анализ характеристик показывает незначительные отличия в характеристиках оптических датчиков, а также демонстрирует хорошие показатели стабильности датчиков, высокую чувствительность и длительный срок их службы.

Основным недостатком оптических датчиков является влияние температуры на выходной сигнал. Температура оказывает влияние на работу фотоприёмника и усилительного тракта, а также на передаточные характеристики оптического фильтра. Используются следующие методы температурной компенсации:

1) использование в качестве компенсирующего элемента термистора (*City Technology, Dynament*);

2) использование компенсационной схемы, содержащей рабочий и эталонный фильтры и два чувствительных элемента (рабочий и эталонный МДП-транзисторы) (*Dynament*). В результате приме-

нения методов температурной компенсации датчики *Dynament* обеспечивают точность измерений при изменении температуры на каждые 10°C (в диапазоне температур от - 20°C до +50°C)  $\pm 1,5 \%$  в диапазоне измерений до 50 % полной шкалы и  $\pm 2 \%$  в диапазоне от 50 % до 100 % полной шкалы.

Срок службы оптического датчика зависит от срока службы источника излучения. *Dynament* использует лампу, срок службы которой составляет 100 000 часов в режиме модуляции питающего напряжения.

Проведенный анализ характеристик выпускаемых промышленностью датчиков показал, что наиболее селективными являются электрохимические и оптические датчики. Однако в сравнении с полупроводниковыми и каталитическими датчиками, электрохимические датчики имеют значительно меньший срок службы (2 года), более длительное время отклика (30-45с), высокую нестабильность характеристик (12-24%/год), а также высокую стоимость. В связи с этим их применение снижает общую эффективность многокомпонентных газоанализаторов. Альтернативой электрохимическим датчикам могут служить оптические датчики, обладающие высокой селективностью, длительным сроком службы и высокой стабильностью характеристик. Однако их использование недопустимо для технологий быстропротекающих процессов (например, оценки состояния взрывоопасных смесей), в связи с их невысоким быстродействием. Оптические датчики имеют достаточно высокую стоимость. Перспективным использованием могли бы считаться полупроводниковые и каталитические датчики, если бы ни их низкая селективность и чувствительность к факторам окружающей среды. В связи с этим их применение в многокомпонентных газоанализаторах требует применения дополнительных методов снижения влияния внешних возмущающих факторов.

## Принципы работы и устройство датчиков газа

### Принцип действия и устройство полупроводникового датчика на основе оксида олова

Полупроводниковый датчик представляет собой небольшую изолирующую подложку, на которой расположены измерительные электроды и нагреватель.

Нагреватель необходим, поскольку процессы, протекающие на поверхности полупроводника при хемосорбции газов, зависят от температуры. Поверх измерительных электродов наносится чувствительный слой. Характеристики датчика определяются материалом чувствительного слоя – химическим составом и кристаллической структурой, а также зависят от свойств всех составляющих элементов датчика – материала подложки, материала и геометрии нагревателя и измерительных электродов, конструкции датчика. В чувствительном слое резистивного полупроводникового датчика при воздействии газовой примеси протекает совокупность взаимосвязанных процессов: электронные процессы, поверхностная и объемная диффузия адсорбированных частиц, перенос носителей заряда между зернами поликристаллических чувствительных элементов. На рисунке 2 представлена схема датчика на основе оксида олова.

Базовая схема включения, предлагаемая фирмой *Figaro*, представлена на рисунке 3 (а), а временные диаграммы на рисунке 3 (б). Датчик работает циклически с периодом 1 с. Короткие (14 мс) импульсы подогрева чередуются с длительными (986 мс) паузами.

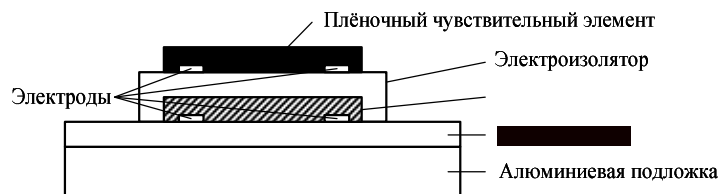


Рисунок 2 - Устройство датчика TGS2442 (корпус и фильтр не показаны)

Малая длительность импульсов подогрева позволяет уменьшить диффузию материала нагревателя в чувствительный элемент.

При нагреве температура чувствительного элемента достигает более  $300^{\circ}\text{C}$ , а спустя 200 мс снижается практически до температуры окружающей среды. Измерение сопротивления чувствительного элемента проводится в конце паузы после подачи импульса подогрева. Работа датчика в циклическом режиме позволяет обеспечивать минимальную чувствительность к влажности. Поскольку технологический разброс начального значения сопротивления  $R_S$  велик, то результат представляют в нормированном виде  $R_S/R_0$ . В качестве нормирующего значения  $R_0$  выбрано значение сопротивления чувствительного элемента при концентрации  $\text{CO} - 100 \text{ ppm}$  и относительной влажности 50 %.

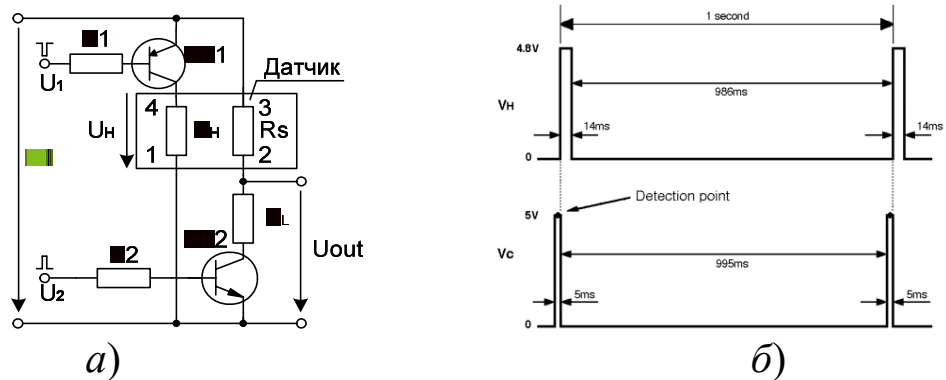


Рисунок 3– Схема включения (а) и временные диаграммы полупроводникового датчика TGS2442 (б):  $R_H$  – сопротивление подогревателя,  $R_S$  и  $R_L$  – соответственно сопротивление чувствительного элемента и нагрузки)

Согласно технической документации датчика TGS2442 и источникам, полупроводниковые датчики обладают перекрестной чувствительностью сразу к нескольким газам (в большей степени к водороду), а также чувствительны к парам воды, к температурным колебаниям и изменениям давления. Таким образом, функция преобразования полупроводникового датчика должна учитывать не только зависимость выходного сигнала от концентрации угарного газа, но и влияние перечисленных выше факторов.

Процесс адсорбции на поверхности полупроводника протекает согласно уравнению Фрейндлиха:

$$\theta = K \cdot C^n,$$

где  $K$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от природы адсорбируемого газа;  $C$  – концентрация газа в воздухе.

На рисунке 4 представлена функция преобразования полупроводникового датчика угарного газа и результаты ее моделирования.

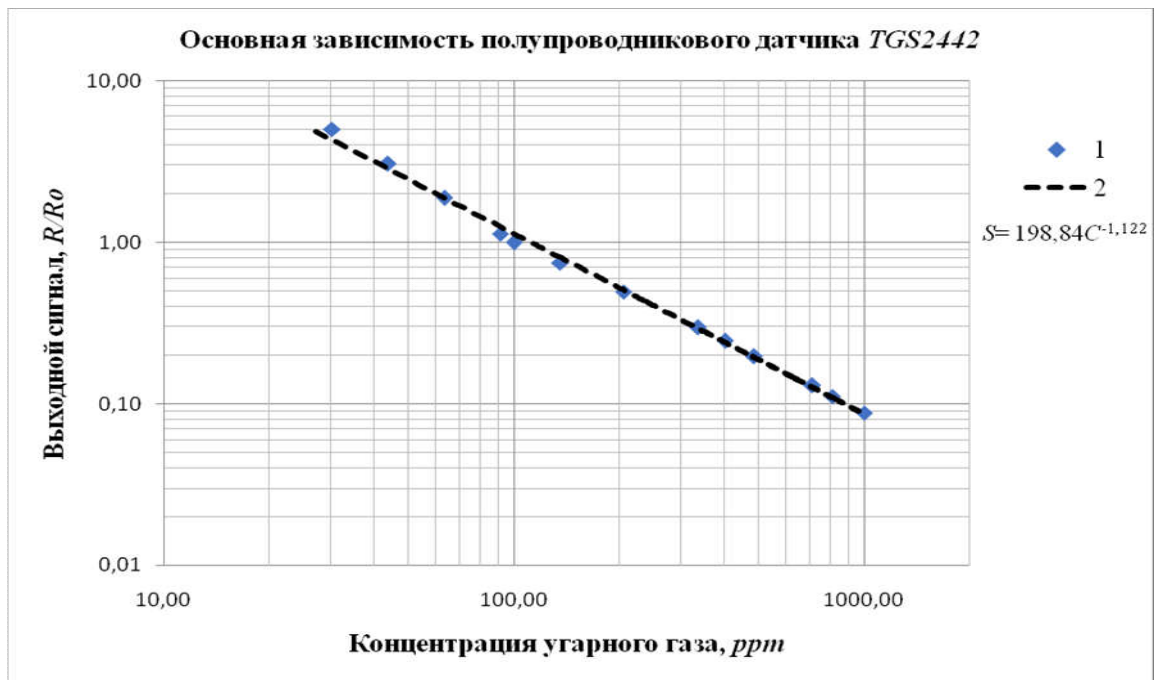


Рисунок 4 - График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации угарного газа: 1 – данные производителя, 2 – уравнение регрессии по данным производителя,  $S$  – сигнал датчика,  $C$  – концентрация газа

Полупроводниковые датчики, ввиду специфики принципа действия, проявляют высокую чувствительность к перекрестным газам, колебаниям температуры и влажности воздуха.

### Принцип работы и устройство каталитических датчиков

Каталитические газочувствительные датчики обычно содержат два элемента – активный (чувствительный) и пассивный (опорный), заключённые в корпус с газопроницаемой мембраной. Элементы представляют собой платиновые спирали в керамических капсулах. Капсула активного элемента содержит катализатор (платина) [2]. Элементы подогреваются током внешнего источника до температуры, при которой может происходить каталитическое



окисление горючих газов. Типовое включение датчика – мостовая схема (рисунок 5). В отсутствие горючих газов температура спиралей одинакова, а мост сбалансирован. Появление в газовой смеси горючих газов в присутствии кислорода приводит к окислительным процессам на поверхности активного элемента и возрастанию его температуры.

В идеальном случае каталитическое горение на опорном элементе не происходит, а его назначение – компенсация влияния параметров окружающей среды. Сопротивление  $R_1$  активного элемента растёт, мост разбалансируется и на его измерительной диагонали появляется напряжение  $\Delta U$ . Однако в реальных преобразователях, особенно однокамерных, элементы влияют друг на друга из-за подгрева и протекания реакций горения на эталонном элементе при его высокой температуре. Это уменьшает чувствительность датчика, а также может повлиять на способность датчика к компенсации влияния параметров окружающей среды.

Простейшая схема включения приводит к взаимному влиянию элементов датчика и из-за последовательного подключения к источнику напряжения. Увеличение сопротивления активного элемента  $R_1$  приводит к уменьшению тока и, следовательно, к уменьшению сопротивления пассивного элемента  $R_2$ . Рассмотрим подробнее процессы в датчике.

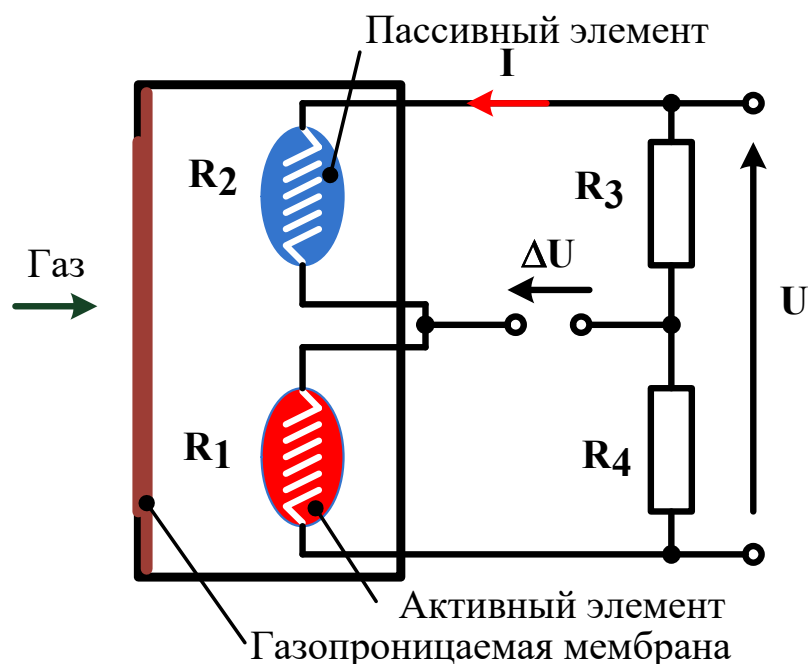


Рисунок 5 – Схема включения каталитического датчика

Термокаталитические датчики применяют для детектирования горючих газов. Выделяемое в результате каталитического горения тепло пропорционально выходному сигналу датчика. В качестве измерительной схемы наиболее часто применяется мостовая.

В основе математической модели термокаталитического датчика взято уравнение теплового баланса:

$$U_R I = \delta_T (T - T_C),$$

где  $U_R$  – падение напряжения;

$I$  – ток резистора;

$\delta_T$  – коэффициент теплоотдачи резистора;

$T$  – температура резистора;

$T_C$  – температура окружающей среды.

На рисунке 6 представлена функция преобразования каталитического датчика. Данная функция линейна вплоть до 60% НКПР.

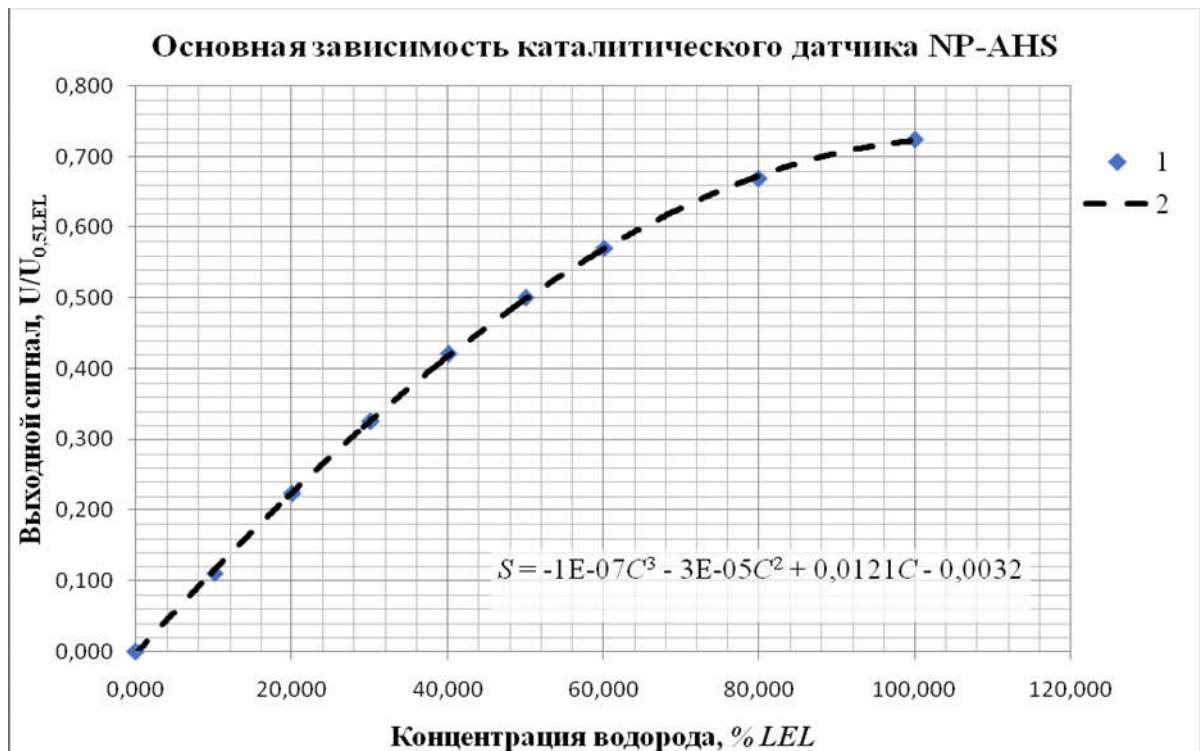


Рисунок 6 - График зависимости выходного сигнала термокаталитического датчика от концентрации водорода: 1 – данные производителя, 2 – уравнение регрессии по данным производителя,  $S$  – сигнал датчика,  $C$  – концентрация газа

## Принцип работы и устройство оптических датчиков

Оптические датчики используются для детектирования углекислого газа и некоторых горючих газов. В основе принципа работы оптических датчиков лежит способность газов поглощать инфракрасное излучение, избирательность достигается выбором длины волны [3]. В качестве модели была взята и модернизирована уже существующая модель, базирующаяся на известном законе поглощения Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(C, \lambda) = I_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda) L C}$$

где  $C$  – концентрация газа;

$\lambda$  – длина волны;

$L$  – длина пути поглощения;

$\alpha(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения газа.

На рисунке 7 представлена конструкция оптического датчика, поясняющая принцип работы.

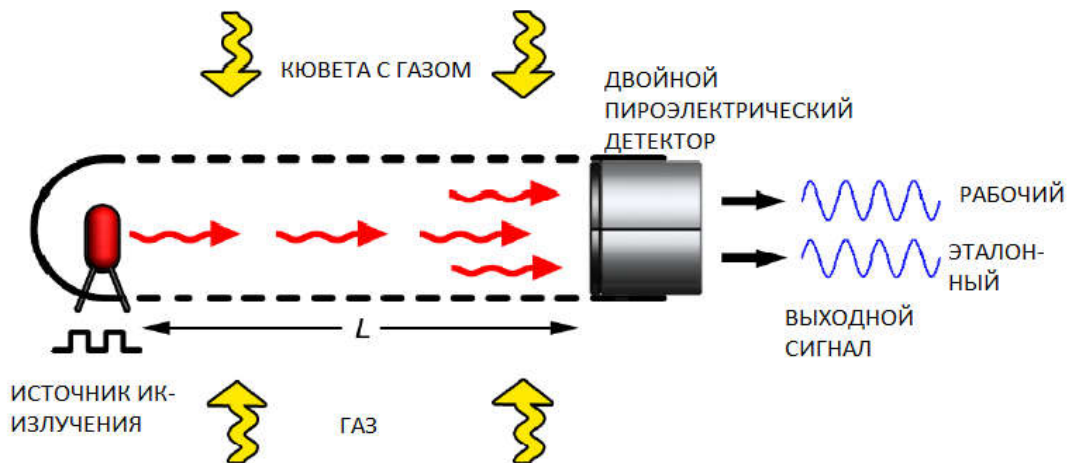


Рисунок 7 - Инфракрасный оптический датчик

На рисунке 8 представлена функция преобразования оптического датчика газа.

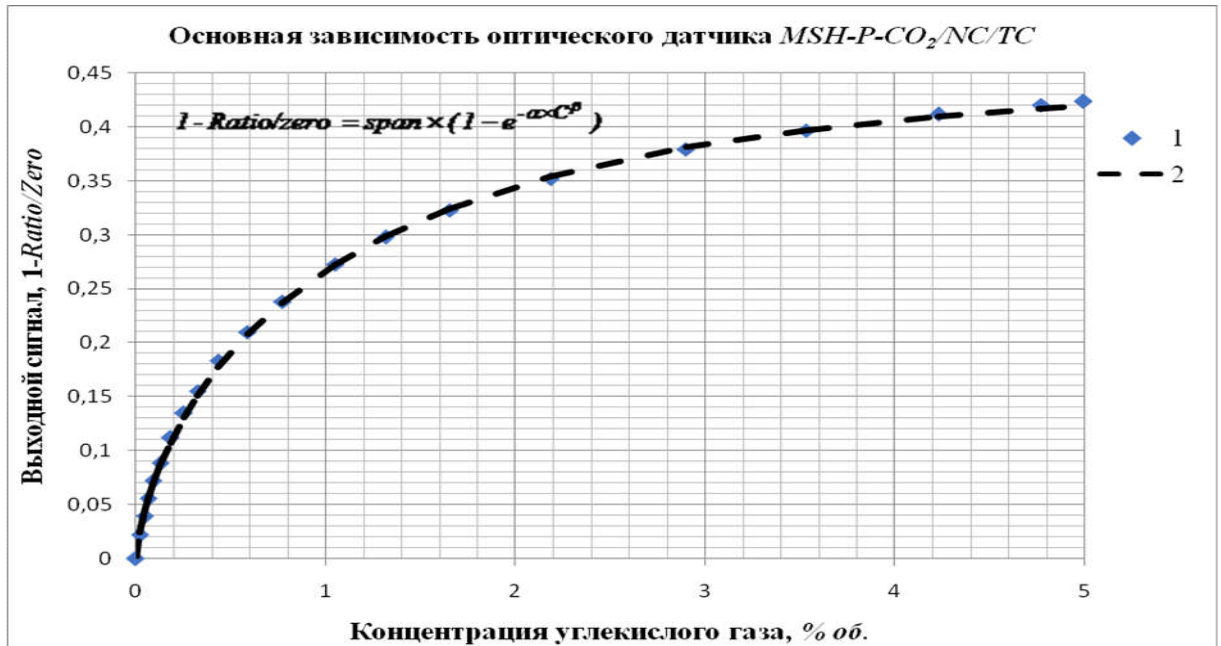


Рисунок 8 - График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации углекислого газа: 1 – данные производителя, 2 – уравнение регрессии по данным производителя

Выходной сигнал датчика рассчитывается из соотношения двух интенсивностей излучений рабочего и эталонного. Рабочее излучение – излучение, полоса инфракрасных длин волн которого соответствует полосе поглощения детектируемого газа. Эталонное излучение – излучение с длиной волны, на которой абсорбция ИК-излучения газом не происходит.

Оптические датчики обладают высокой избирательностью, в связи с чем модель оптических датчиков учитывает только влияние колебаний температуры и давления окружающей среды.

### **Принцип работы и устройство электрохимических датчиков**

Для описания функциональной зависимости выходного сигнала электрохимического (амперометрического) датчика от концентрации детектируемого газа использовалась уже существующая линейная математическая модель [4]. Амперометрические датчики представляют собой гальваническую ячейку, в которой протекает электрохимическая реакция. Такие датчики наиболее часто используют для детектирования кислорода, ток, образующийся в резуль-

тате реакции прямо пропорционален его концентрации. Кислород поступает в ячейку через специальную мембрану (наиболее часто, политетрафторэтиленовую), поэтому в основу модели положен закон Фика:

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $J$ - плотность потока вещества;  
 $\partial C/\partial x$  – градиент концентрации.

Учитывая принцип работы датчика, основным мешающим фактором, оказывающим влияние на выходной сигнал, является давление. Датчики данного типа высоко избирательны, учитывая специфику электрохимических реакций. Электрохимические датчики в подавляющем большинстве имеют линейную функцию преобразования.

### Математические модели датчиков с учетом влияния факторов окружающей среды

В таблице 10 представлены усовершенствованные модели датчиков газа, учитывающие влияние факторов окружающей среды на выходной сигнал датчика.

Таблица 10 – База математических моделей датчиков газа

Тип датчика	Математическая модель датчика
1	2
Полупроводниковый	$\frac{R_s}{R_0} = \frac{1}{(A_1 + A_2(C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} + A_3(C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} (C_{i_o} \frac{P}{P_0})^{n_2} + A_4(C_{i_o} \frac{P}{P_0})^{n_2} + \dots + A_6(C_{H_2O} \frac{P}{P_0})^{n_1} (C_{i_m} \frac{P}{P_0})^{n_3} + A_7(C_{i_m} \frac{P}{P_0})^{n_4}) \times e^{A_8 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} + A_5,$

1	2
Термокаталитический	$\frac{\Delta U}{2\Delta U_{0,5LEL}} = \frac{\frac{\gamma}{2} \left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right] + A_5 C_{im} P \right)}{\gamma \left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right] + A_5 C_{im} P \right)} + \frac{\left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{io} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{io} P}} \right] + A_5 C_{im} P \right)}{\left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right] \right)} \delta_{T_H} (1 + \gamma T_{CH}) + 2\delta_{T_H} \frac{P}{P_0} (1 + \gamma T_c)$
Оптический, инфракрасный	$S = A \cdot \left( 1 - e^{-\alpha \cdot \left( C_{io} \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \right)^\beta} \right)$
Электрохимический, амперометрический	$U_{\text{вых}} = A \cdot C_{io} \cdot \frac{P}{P_0}$

В таблице 11 приведены обозначения символов в математических моделях.

Таблица 1.11 – Обозначения символов в математических моделях

Общие обозначения	$C_{io}$	концентрация основного газа
	$C_{im}$	концентрация мешающего газа
	$C_{H_2O}$	концентрация водяных паров
	$P, P_0$	давление воздуха, давление при н.у.
	$RH, RH_0$	влажность воздуха, влажность при н.у.
	$T, T_0$	температура воздуха, температура при н.у.
	$A_i$	параметризуемые коэффициенты
Полупроводниковый	$n$	параметризуемые коэффициенты
	$R_s, R_0$	сопротивление датчика, сопротивление датчика при фиксированной концентрации
Термокаталитический	$\delta_{T_H}$	коэффициент теплоотдачи резистора при нормальных условиях

	$\gamma$	температурный коэффициент сопротивления
	$\Delta U, \Delta U_{0,5LEL}$	напряжение моста, выходное напряжение моста при концентрации газа 0,5 <i>LEL</i>
	$T_{CH}$	температура среды номинальная.
Оптический, инфракрасный	$\alpha, \beta$	параметризуемые коэффициенты
	$S$	сигнал датчика
Электрохимический, амперометрический	$U_{ВЫХ}$	выходное напряжение

## 1. Практическая работа №1 «Выбор датчиков при проектировании газоанализатора»

### 1.1 Варианты заданий

В таблице 12 выбрать детектируемый газ и тип датчика.

Таблица 12 – Варианты заданий

№	Детектируемый газ	Тип датчика
1	$CO$	полупроводниковый
2	$H_2$	термокаталитический
3	$CO_2$	оптический
4	$CH_4$	термокаталитический
5	$O_2$	электрохимический
6	$H_2S$	полупроводниковый
7	$CO$	оптический
8	$H_2$	полупроводниковый
9	$CO_2$	электрохимический
10	$CH_4$	полупроводниковый
11	$O_2$	оптический
12	$H_2S$	электрохимический
13	$CO$	электрохимический
14	$H_2$	оптический
15	$CO_2$	полупроводниковый
16	$CH_4$	оптический

### 1.2 Выполнение практической работы

1. Изучить структурно-функциональные схемы газоанализаторов, представить в отчете типовую схему.

2. Найти от пяти аналогов, выпускаемых промышленностью газоанализаторов. Детектируемый газ выбрать в соответствии с вариантом заданий.

3. Составить сводную таблицу параметров газоанализаторов с указанием типа используемых датчиков.

4. Провести анализ параметров, сформулировать выводы.



5. Изучить свойства контролируемого газа, составить требования к диапазону измерения и быстродействию датчика.

6. Изучить принцип работы, устройство, схемы включения датчика в соответствии с вариантом задания.

7. Осуществить обоснованный выбор датчика для проектирования газоанализатора (детектируемый газ соответствует варианту заданий).

8. Определить и обосновать возможность применения типа датчика из варианта заданий для измерения концентрации соответствующего газа.

9. Оформить отчет.

### **1.3 Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные элементы схемы газоанализаторов и их назначение.

2. Перечислите нормативные документы, устанавливающие требования к выпускаемым промышленностью газоанализаторам.

3. Перечислите основные параметры газоанализаторов. Чем они определяются?

4. На какие две группы можно разделить контролируемые газы?

5. Дайте определение понятиям ПДК и НКПР.

6. Какие типы датчиков вы знаете?

7. Есть ли ограничения по типам применяемых датчиков в зависимости от свойств контролируемого газа?

8. Перечислите основные параметры датчиков газа.

9. От чего зависят параметры датчиков?

10. Сопоставьте характеристики различных типов датчиков, дайте рекомендации по их использованию для контроля конкретных газов.

### **1.4 Содержание отчета**

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ и содержать:

1. Титульный лист;

2. Оглавление;

3. Наименование работы, цель исследований;
4. Описание и структурно-функциональная схема газоанализатора;
5. Сводная таблица параметров газоанализаторов, выводы;
6. Свойства детектируемого газа, требования к датчику;
7. Схема датчика, краткое описание принципа работы;
8. Таблица с характеристиками датчиков различного типа на детектируемый газ, выводы.
9. Ответы на контрольные вопросы;
10. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы (ссылки на используемую техническую документацию).

### 1.5 Список литературы

1. Дрейзин, В. Э. Сравнительный анализ характеристик промышленных газочувствительных датчиков / В.Э. Дрейзин, Е. О. Брежнева // Датчики и системы. - 2011. – № 3. – С. 68-78
  2. Датчик монооксида углерода TGS2442. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.figarosensor.com/products/2442pdf>
  3. Датчик водорода HLS-440. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: [http://www.applied-sensor.com/pdfs/HLS-440\\_1009.pdf](http://www.applied-sensor.com/pdfs/HLS-440_1009.pdf)
  4. Датчик монооксида углерода AS-MLC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: [http://www.appliedsensor.com/pdfs/AS-MLC\\_CO\\_0809.pdf](http://www.appliedsensor.com/pdfs/AS-MLC_CO_0809.pdf)
  5. Датчик монооксида углерода MQ-7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: [http://eng.gassensor.ru/data/files/carbon\\_monoxide/MQ-7.pdf](http://eng.gassensor.ru/data/files/carbon_monoxide/MQ-7.pdf)
  6. Датчик водорода СГ-2110. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.deltagaz.ru/sensor.html>
  7. Датчик метана GGS 3000 T. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.umweltsensortechnik.de/index3.htm>
- Официальный сайт производителя Figaro Engineering Inc. Режим доступа: <http://www.figarosensor.com>

8. Официальный сайт производителя Applied Sensor. Режим доступа: <http://www.motech.de>

9. Датчик сероводорода SureCell- H<sub>2</sub>S (H). Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа:

<http://www.sixthsens.ru/pdf/Sixth-Sense/Surecell-H2S-H.pdf>

10. Датчик кислорода O<sub>2</sub>-A1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://eng.gassensor.ru/data/files/pdf/Alphasense/O2A1.pdf>

11. Датчик водорода H<sub>2</sub>/S-1000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа:

<http://eng.gassensor.ru/data/files/pdf/Membrapor/H2/H2-S-1000.pdf>

12. Датчик монооксида углерода МФС-8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.gassense.ru/sensors/sensor-mfc-8.html>

13. Датчик монооксида углерода NAP — 505. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.nemoto.co.jp/en/products/sensor/manual/nap-505.html>

14. Датчик водорода H<sub>2</sub>/SA-1000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.gassensor.ru/data/files/pdf/Membrapor/H2/H2-SA-1000.pdf>

15. Официальный сайт Neomoto technology. Режим доступа: [http://www.nemoto.co.jp/en/column/09\\_ecco.html](http://www.nemoto.co.jp/en/column/09_ecco.html)

Официальный сайт производителя City Technology. Режим доступа: <http://www.citytech.com/index.html>

16. Датчик метана NP-17. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа:

<http://pdf.directindustry.com/pdf/nemoto/catalytic-flammable-gas-sensors-np-17/25177-120251.html>

17. Датчик метана 4P-75C CiTipeL. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.citytech.com/PDF-Datasheets/4p75ct4.pdf>

18. Датчик метана ГР1.0. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: [http://www.inkram.ru/catalog/ckva01\\_files/PITK%20datasheet.pdf](http://www.inkram.ru/catalog/ckva01_files/PITK%20datasheet.pdf)

19. Датчик углекислого газа IRceL. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.citytech.com/PDF-Datasheets/ircelco2.pdf>
20. Официальный сайт производителя Dynament. Режим доступа: <http://www.dynament.com>
21. Датчик углекислого газа MSH-P-CO2/NC/TC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.dynament.com/infrared-sensor-data/tds0004.PDF>
22. Датчик угарного газа CO SM – COM. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: [http://www.gassensor.ru/data/files/pdf/smartgas/SM\\_datasheet\\_en.pdf](http://www.gassensor.ru/data/files/pdf/smartgas/SM_datasheet_en.pdf)
23. Датчик углекислого газа MSH-P-CO2/NC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Режим доступа: <http://www.dynament.com/infrared-sensor-data/tds0037.pdf>

## 2. Практическая работа №2 «Анализ и обработка информации при построении модели датчика»

### 2.1 Варианты заданий

В соответствии с таблицей 13 выбрать детектируемый газ и тип датчика.

Таблица 13 – Варианты заданий

№	Детектируемый газ	Тип датчика
1	$CO$	полупроводниковый
2	$H_2$	термокаталитический
3	$CO_2$	оптический
4	$CH_4$	термокаталитический
5	$O_2$	электрохимический
6	$H_2S$	полупроводниковый
7	$CO$	оптический
8	$H_2$	полупроводниковый
9	$CO_2$	электрохимический
10	$CH_4$	полупроводниковый
11	$O_2$	оптический
12	$H_2S$	электрохимический
13	$CO$	электрохимический
14	$H_2$	оптический
15	$CO_2$	полупроводниковый
16	$CH_4$	оптический

### 2.2 Выполнение практической работы

1. Опираясь на результаты предыдущей работы, осуществить выбор конкретного датчика для детектирования газа (см. вариант заданий).

В случае если для детектирования газа из списка, невозможно использовать тип датчика, представленный в задании, его можно заменить на любой другой тип датчика, опираясь на результаты практической работы №1.

2. Подробно описать принцип работы датчика, привести его схему включения и характеристики. Проанализировать достоинства и недостатки, определить их источники. Найти и описать методы, применимые для улучшения характеристик, предложить свои варианты.

3. Проанализировать основную функцию преобразования датчика, представляющую собой зависимость выходного сигнала датчика от концентрации газа, поместить ее в отчет. Сделать выводы о линейности функции.

4. Произвести оцифровку основной функции преобразования и сохранить полученные данные в виде таблицы.

5. Оформить отчет.

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Принцип работы, достоинства и недостатки, схемы включения полупроводниковых датчиков. Перечень детектируемых газов.

2. Принцип работы, достоинства и недостатки, схемы включения электрохимических датчиков. Перечень детектируемых газов.

3. Принцип работы, достоинства и недостатки, схемы включения оптических датчиков. Перечень детектируемых газов.

4. Принцип работы, достоинства и недостатки, схемы включения термокаталитических датчиков. Перечень детектируемых газов.

5. Что представляет собой функция преобразования датчиков? Что служит источником нелинейности функции преобразования?

6. Для каких типов датчиков характерны линейные функции преобразования? К чему приводит нелинейность функции преобразования датчиков?

7. Какие способы и программные средства оцифровки вы знаете?

8. Чем определяется количество точек при оцифровке данных? К чему приведет занижение и завышение числа точек при оцифровке?

## 2.4 Содержание отчета

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ и содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;
4. Сводная таблица выбора датчика определенного типа, выводы;
5. Принцип работы, схемы включения, анализ достоинств и недостатков, методы снижения погрешностей измерения;
6. Основная функция преобразования датчика, выводы;
7. Таблица с результатами оцифровки функции;
8. Ответы на контрольные вопросы;
9. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы (ссылки на используемую техническую документацию).

### 3. Практическая работа №3 «Моделирование характеристики преобразования датчика»

#### 3.2 Варианты заданий

В соответствии с вариантом задания выписать детектируемый газ и тип датчика (таблица 14).

Таблица 14 – Варианты заданий

№	Детектируемый газ	Тип датчика
1	$CO$	полупроводниковый
2	$H_2$	термокаталитический
3	$CO_2$	оптический
4	$CH_4$	термокаталитический
5	$O_2$	электрохимический
6	$H_2S$	полупроводниковый
7	$CO$	оптический
8	$H_2$	полупроводниковый
9	$CO_2$	электрохимический
10	$CH_4$	полупроводниковый
11	$O_2$	оптический
12	$H_2S$	электрохимический
13	$CO$	электрохимический
14	$H_2$	оптический
15	$CO_2$	полупроводниковый
16	$CH_4$	оптический

#### 3.3 Выполнение практической работы

1. Выяснить и записать базовую математическую модель датчика, учитывающую зависимость выходного сигнала датчика от концентрации газа.

2. Уточнить единицы измерения выходного сигнала датчика и концентрации газа на графике, представленном производителем, для ранее выбранного датчика (по варианту задания).



3. Используя результаты оцифровки, полученные в практической работе №2, построить исходную функцию преобразования датчика, используя программные средства *MatLAB*, *Excel* и т.д. Подписать оси, построить линию тренда.

4. Осуществить аппроксимацию полученной функции с помощью математической модели из п.1. Выписать значения полученных коэффициентов. Записать модель, заменив коэффициенты значениями ранее неизвестных параметров.

5. Определить степень нелинейности функции преобразования.

6. Оформить отчет.

### 3.4 Контрольные вопросы

1. Что такое функция преобразования?
2. Какие модели датчиков бывают?
3. В недостаток эмпирических моделей датчиков?
4. Какие факторы не учтены в представленных моделях? Каковы последствия?
5. Какие физико-химические эффекты лежат в основе принципа работы датчиков?
6. Поясните цели моделирования датчиков. Какие задачи позволяют решать модели датчиков?
7. Что такое аппроксимация?
8. Что представляет собой выходной сигнал оптического, электрохимического, полупроводникового и каталитических датчиков?
9. Как знание принципов работы датчиков могут помочь в разработки их моделей?
10. К чему приводит нелинейность функции преобразования датчика?

### 3.5 Содержание отчета

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ и содержать:

1. Титульный лист;
2. Оглавление;
3. Наименование работы, цель исследований;

4. Математическая модель датчика газа, график функции преобразования из технической документации;
5. График функции, полученный восстановлением оцифрованных данных с указанием линии тренда и подписанными осями;
6. График функций исходной и полученной в результате моделирования (разместить на графике легенду);
7. Модель конкретного датчика (заменить коэффициенты исходной модели на полученные в результате аппроксимации значения параметров);
8. Расчет и результаты оценки нелинейности функции преобразования датчика.
9. Ответы на контрольные вопросы;
10. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы (ссылки на используемую техническую документацию).

### 3.6 Список литературы

1. Бубнов, Ю. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе / Ю. Бубнов, А. Голиков, А. Казак // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2008. - Спецвыпуск. – С. 72-76.
2. Дрейзин, В.Э. Моделирование каталитического датчика водорода / В. Э. Дрейзин, Е.О. Брежнева, О. Г. Бондарь // Известия ЮЗГУ. - 2011. - Ч. 1. – № 5(38). – С. 69-76.
3. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч.2. Массообменные процессы / Дытнерский, Ю.И. – М.: «Химия», 1995. - 368 с.
4. Подтелкина О.А. Моделирование оптического сенсора/ В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования: от теории к практике. Материалы II международной научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. 2018. - С. 180-188.

## 4. Исследование и оптимизация модели датчика

### 4.1 Варианты заданий

Согласно варианту задания в таблице 15 выбрать детектируемый газ и тип датчика.

Таблица 15 – Варианты заданий

№	Детектируемый газ	Тип датчика
1	$CO$	полупроводниковый
2	$H_2$	термокаталитический
3	$CO_2$	оптический
4	$CH_4$	термокаталитический
5	$O_2$	электрохимический
6	$H_2S$	полупроводниковый
7	$CO$	оптический
8	$H_2$	полупроводниковый
9	$CO_2$	электрохимический
10	$CH_4$	полупроводниковый
11	$O_2$	оптический
12	$H_2S$	электрохимический
13	$CO$	электрохимический
14	$H_2$	оптический
15	$CO_2$	полупроводниковый
16	$CH_4$	оптический

### 4.2 Выполнение практической работы

1. Изучить математические модели, представленные в таблицах 10-11. Сопоставить с моделями, полученными в практической работе №3. Пояснить различия.

2. Собрать и проанализировать необходимую информацию по влиянию дополнительных факторов на моделируемый датчик. Выяснить физико-химические явления, лежащие в основе принципа работы датчика.

3. Предложить самостоятельно вариант модели, учитывающий влияние дополнительных факторов и принцип работы датчиков.

4. Осуществить аппроксимацию полученной модели по основной зависимости при нормальных условиях, а также по дополнительным зависимостям в случае их наличия.

5. Рассчитайте погрешность аппроксимации основной функции полученной моделью. Сопоставьте погрешности аппроксимации с помощью моделей, полученных в практических работах №3 и №4. Сформулируйте выводы.

6. Провести оптимизацию авторской модели датчика, достигнув компромисса между величиной погрешности и сложностью аппроксимации.

7. Оформить отчет.

### **4.3 Контрольные вопросы**

1. В чем преимущества моделей, построенных с учетом физико-химических принципов работы датчиков?

2. Сопоставьте эмпирические и теоретические модели.

3. Какие дополнительные факторы влияют на датчик из вашего варианта заданий?

4. Каковы дополнительные погрешности от влияния дополнительных факторов (определить количественно)?

5. Какие методы снижения влияния дополнительных факторов вы знаете?

6. В чем преимущества линейных моделей? В чем недостатки?

7. Как влияет сложность на модели на процесс аппроксимации?

8. Что такое «оптимизация»? Как она осуществляется и по каким критериям?

### **4.4 Содержание отчета**

Отчёт должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ и содержать:

1. Титульный лист;

2. Оглавление;

3. Наименование работы, цель исследований;

4. Математические модели датчика (исходная и из таблицы 2), дополнительные факторы, учтенные в модели из таблицы 2;
5. Описание физико-химических процессов, протекающих в датчике газа, графики влияния дополнительных факторов на датчик с указанием дополнительных погрешностей;
6. Авторская модель датчика;
7. Графики, демонстрирующие результаты аппроксимации функций авторской моделью с указанием погрешностей;
8. Результаты сопоставления погрешностей, оптимизации и выводы;
9. Ответы на контрольные вопросы;
10. Перечень литературы, использованной при подготовке и выполнении работы (ссылки на используемую техническую документацию).

#### **4.5 Список использованных источников**

1. Бубнов, Ю. Полупроводниковые газовые сенсоры и газо-аналитические приборы на их основе / Ю. Бубнов, А. Голиков, А. Казак // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2008. - Спецвыпуск. – С. 72-76.
2. Дрейзин, В.Э. Моделирование каталитического датчика водорода / В. Э. Дрейзин, Е.О. Брежнева, О. Г. Бондарь // Известия ЮЗГУ. - 2011. - Ч. 1. – № 5(38). – С. 69-76.
3. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч.2. Массообменные процессы / Дытнерский, Ю.И. – М.: «Химия», 1995. - 368 с.
4. Подтелкина О.А. Моделирование оптического сенсора/ В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования: от теории к практике. Материалы II международной научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. 2018. - С. 180-188.