

УДК 681.586.74

М.В. Хиврин, С.С. Кубрин, Е.М. Гамарц, В.Б. Раменский
ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ
О СОСТОЯНИИ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ
С ПОМОЩЬЮ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО
ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

Изложены результаты исследований и разработки шахтного газоанализатора, предназначенного для контроля состава рудничной атмосферы в нормальных условиях и при аварийной ситуации.

Ключевые слова: рудничная атмосфера, газоанализатор, шахта, взрывоопасность воздушной среды.

Достоверный и оперативный анализ состава атмосферы в горных выработках важен как с точки зрения опасности вдыхаемых газов для здоровья, так и с точки зрения взрывоопасности воздушной среды. Этот анализ необходим и в обычных условиях работы шахты, и, в особенности, в аварийных ситуациях.

В соответствии с правилами безопасности на угольных шахтах состав атмосферы в горных выработках нормируется по следующим газовым компонентам: метан (CH₄), диоксид углерода (CO₂), водород (H₂), а также монооксид углерода (CO), оксид и диоксид азота (NO, NO₂), сернистый ангидрид (SO₂), сероводород (H₂S) [1]

В аварийной ситуации (пожар, взрыв) состав рудничной атмосферы может в значительной степени отличаться от обычного. Например, концентрация кислорода может уменьшаться до 2 %, а концентрация других газов может увеличиться: углекислого газа до 8 %, метана до 30 %, окиси углерода до 12 %, водорода до 10 %. Смесь этих газов в определенных сочетаниях может быть взрывчата и, при избыточной концентрации кислорода рассчитывается в соответствии с классическим уравнением Ле Шателье [2]:

$$X_{\text{CH}_4} \Delta 5 + X_{\text{CO}} \Delta 12,5 + X_{\text{H}_2} \Delta 4 \geq 1$$

Степень опасности и взрывоопасности рудничной атмосферы можно оперативно оценить с помощью малогабаритного газоанализатора, измеряющего основные газовые компоненты CH₄, O₂, H₂, CO, CO₂.

В настоящее время в России и за рубежом разработаны многокомпонентные взрывозащищенные переносные и портативные приборы-газоанализаторы. Однако они предназначены, в основном, для измерения параметров рудничной атмосферы, находящихся в допустимых пределах.

Например, газоанализатор ORION plus фирмы MSA измеряет CH₄, CO₂, O₂, CO, H₂S; газоанализатор TX6522 компании TROLEX может измерять CH₄, CO, O₂, H₂S; газоанализатор MX 2100 фирмы OLDHAM измеряет CH₄, CO₂, O₂, CO, H₂ [3, 4, 5]

Достоверность измеряемых этими приборами параметров в значительной степени зависит от применяемых первичных преобразователей.

До недавнего времени в качестве первичных преобразователей в шахтных портативных газоанализаторах в канале измерения метана применялись термохимические (0-5 % CH₄) и термокондуктометрические (5-30 % CH₄) чувствительные элементы; для измерения H₂ (0-5 %) термокондуктометрические и электрохимические сенсоры, а для измерения O₂ (0-21 %), CO (0-200 ppm) электрохимические сенсоры.

Термокондуктометрический метод основан на зависимости теплопроводности газовой смеси от концентрации газовых компонентов. Коэффициенты теплопроводности метановоздушной смеси $\lambda_{см}$, метана λ_m и воздуха λ_b связаны соответствующей зависимостью в уравнении [6]

$$\lambda_{см} = C_m \lambda_m + (1+C_m)\lambda_b$$

где C_m – концентрация метана

Это уравнение справедливо для смеси метана с воздухом.

Сухой атмосферный воздух содержит около 78 % азота, 21 % кислорода, 0,9 % аргона, 0,03 % углекислого газа, а также микроконцентрации неона, гелия, метана, криптона, водорода, окислов азота и ксенона.

Коэффициенты теплопроводности $\lambda(10^{-3}$ Вт/м) отдельных газовых компонентов при температуре 300К и нормальном атмосферном давлении имеют значительный разброс значений[7]: воздух - 26,2; кислород - 26,7; углекислый газ - 16,6; азот - 25,7; водород - 183; монооксид углерода - 24,9; метан - 34,2.

Следовательно, при чрезвычайных ситуациях, когда концентрация этих газовых компонентов в рудничной атмосфере может изменяться в широких пределах, погрешность измерения **термокондуктометрическими преобразователями** за счет плохой избирательности будет значительно превышать допустимые пределы.

Принцип действия **термохимических первичных преобразователей** основан на использовании процесса каталитического окисления метана на рабочем элементе и, следовательно, показания таких датчиков зависят от процентного содержания кислорода в рудничной атмосфере.

В качестве **электрохимических газовых сенсоров** в малогабаритных газоанализаторах используются первичные преобразователи на твердых электролитах: потенциометрические мембранные, импедансные и амперометрические. Все серийно выпускающиеся электрохимические сенсоры обладают различной чувствительностью, зависимостью параметров от температуры, различным быстродействием. Особенностью этих сенсоров является перекрестная чувствительность к другим газам. Несмотря на это они широко применяются в малогабаритных газоанализаторах для измерения концентрации токсичных газов.

В последнее время для измерения CH₄ и CO₂ все чаще применяются **оптические инфракрасные сенсоры**, которые обладают рядом существенных преимуществ, в том числе *высокой избирательностью и долговечностью, обеспечивают стабильность и надежность работы в среде с низким содержанием кислорода* [8].

Многокомпонентные шахтные газоанализаторы являются одним из важных средств обеспечения безопасности, и должны обеспечивать высокую достоверность измерений параметров рудничной атмосферы, которые могут менять-

ся в широких пределах от нормальных значений до аварийных. Поэтому к первичным преобразователям должны предъявляться **особые требования, основными из которых являются:**

- **высокая достоверность измерения отдельных газовых компонентов рудничной атмосферы;**
- **надежная работа в атмосфере с низким содержанием кислорода;**
- **высокая селективность и чувствительность;**
- **низкая перекрестная чувствительность (или её отсутствие);**
- **низкая погрешность измерений в широком диапазоне концентраций;**
- **высокая перегрузочная способность;**
- **низкая энергоёмкость.**

Эти требования были взяты за основу при выборе сенсоров для измерительных каналов разработанного многофункционального многокомпонентного газоанализатора (МГ), предназначенного для работы как в автономном режиме так и в составе мобильной локальной системы оперативного контроля рудничной атмосферы.

МГ имеет два оптических датчика для измерения концентрации углеводородов (калибровка по метану), один оптический датчик углекислого газа и три электрохимических датчика (СО, Н₂, О₂).

Комплексное измерение концентрации пяти газов в одном малогабаритном переносном многокомпонентном газоанализаторе имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при реализации схемных, конструктивных и программных решений в приборе.

Измерение концентрации монооксида углерода и водорода в промышленных образцах малогабаритных газоанализаторов в подавляющем большинстве случаев осуществляется с помощью электрохимических датчиков. Однако, при необходимости одновременного измерения этих газов в одном приборе возникает проблема, заключающаяся в перекрестной чувствительности электрохимических сенсоров, т.е. чувствительности сенсоров не только к «своему», но и к другим газам.

В нашем случае перекрестной чувствительностью к водороду обладает электрохимический сенсор, измеряющий монооксид углерода. Присутствие 100 ppm (0,0001 % об.) водорода в анализируемой пробе воздуха воспринимается обычным сенсором СО как 70 ppm (81 мг/м³) монооксида углерода.

Фирма «General Monitors» приводит данные по перекрестной чувствительности электрохимических сенсоров для различных газов [9], которые подтверждают сильное влияние Н₂ на электрохимический сенсор СО.

Решением проблемы совместного измерения водорода и монооксида углерода может быть использование инфракрасных оптических селективных сенсоров, в основе работы которых лежит соотношение Бугера Ламберта [10]:

$$-k(\lambda) \ell$$

$$I = I_0 \cdot e$$

где I_0 – интенсивность падающего ИК потока излучения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, I – интенсивность светового потока на выходе кюветы, длиной ℓ ,

$k(\lambda)$ – коэффициент поглощения оптического излучения газом, концентрация которого определяется прибором.

Из приведенного соотношения очевидно, что поглощение излучения, и, следовательно, концентрация газа в оптической кювете тем больше, чем выше коэффициент $k(\lambda)$ и длина кюветы (l).

Измерение концентрации водорода этим методом затруднительно, т.к. коэффициент поглощения $k(\lambda)$ для водорода в инфракрасном диапазоне крайне мал. Монооксид углерода имеет наиболее сильную полосу поглощения в инфракрасной области спектра с длиной волны около 4,7 мкм.

Для оценки возможности реализации инфракрасного датчика CO проведен сравнительный анализ с реализованным инфракрасным датчиком CO₂, длина волны которого соответствует линии поглощения 4,3 мкм, что позволяет использовать ту же элементную базу ИК техники (излучатели, фотоприемники, интерференционные фильтры).

Дистанция измерений l находится в обратно пропорциональной зависимости от коэффициентов поглощения измеряемых газов.

Для углекислого газа (CO₂) и угарного газа (CO) это соответствует уравнениям:

$$\tau(\text{CO}_2) = \exp(-k_1 \cdot l_1)$$

$$\tau(\text{CO}) = \exp(-k_2 \cdot l_2)$$

где $\tau = \frac{I}{I_0}$ – коэффициент пропускания измеряемого газа; k_1, k_2 – коэффициенты

поглощения измеряемых газов соответственно CO₂, CO;

Отсюда дистанцию измерений для CO можно определить из соотношения:

$$m = l_2/l_1 = k_1/k_2$$

если $l_1 = 10$ см, $k_1 = 0,19$, $k_2 = 0,002$,

то $l_2 = k_1 \cdot l_1 / k_2 = 950$ см.

Таким образом, при измерении угарного газа (CO) для обеспечения такого же отношения сигнал/шум, как и при измерении углекислого газа (CO₂) на лабораторном макете прибора с $l_1=10$ см, необходимо использование кюветы с дистанцией измерения, равной 950 см.

Исходя из конструктивных и общих габаритных соображений, а также для упрощения расчета, дистанция измерения выбрана равной $l_2 = 960$ см, а длина оптического устройства равной $L = 32$ см. Тогда количество прохождений светового пучка в многопроходной кювете между зеркалами будет определено из выражения

$N = l/L = 30$, что практически трудно реализуемо.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали принципиальную возможность реализации оптических датчиков CO в стационарных приборах, имеющих достаточно большие габариты. Учитывая это, можно сделать реализация инфракрасного датчика CO в малогабаритном МГ, затруднительна на имеющейся в настоящее время элементной базе оптоэлектроники.

Использование малогабаритных электрохимических сенсоров позволяет разработать малогабаритный прибор, но **возникает проблема получения достоверной информации из-за перекрестной чувствительности электрохимических преобразователей.**

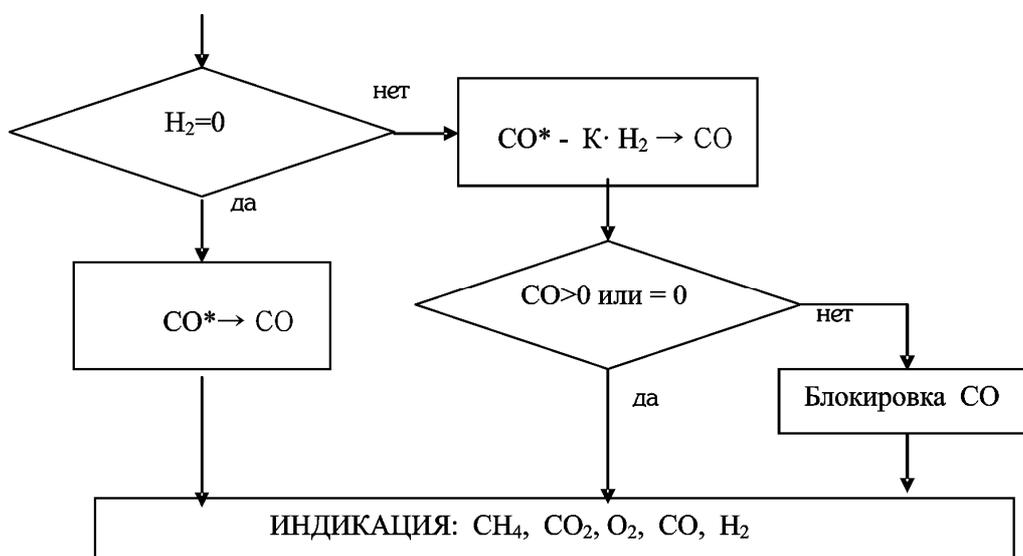


Рис. 1

При использовании электрохимических сенсоров СО возможна программная компенсация перекрестной чувствительности. Для этого необходимо контролировать концентрацию водорода, и по ее значению вводить поправку в показания канала «СО». Такой алгоритм позволяет одновременно измерять концентрацию СО и H_2 одним многокомпонентным газоанализатором. В случае отсутствия стабильности возможно блокировать работу канала «СО» при концентрации водорода выше 0,01 % об. доли. При такой концентрации водорода погрешность от нее в канале «СО» не превысит предельно допустимого значения 4,3 ppm (5 мг/м³). Программа корректировки показаний канала «СО» должна различать реальное присутствие водорода в атмосфере от аппаратного смещения нуля у водородного сенсора, т.к. в противном случае возможна ложная блокировка канала «СО».

На рис. 1 показана блок-схема алгоритма программной обработки результатов измерений в каналах оксида углерода и водорода.

Если водород не обнаружен ($H_2 = 0$), то текущая концентрация оксида углерода СО выводится на индикацию без корректировки.

Если водород обнаружен ($H_2 > 0$), то вычисляется его вклад в реакцию сенсора оксида углерода через коэффициент перекрестной чувствительности - $K \cdot H_2$. Если этот вклад меньше или равен показаниям сенсора оксида углерода, то производится коррекция данных, и результат выводится на индикацию.

Если суммарные показания сенсора оксида углерода меньше, чем приведенные к его выходу показания водородного датчика, то считается, что произошло смещение нуля в канале водорода, и канал СО блокируется.

Предельная разрешающая способность измерительной части канала H_2 определяется разрядностью АЦП и динамическим диапазоном выходного сигнала

сенсора H_2 . При 12-разрядном АЦП и максимальном выходном напряжении 1В (5 %об.) разрешение составит 0,003 % об.

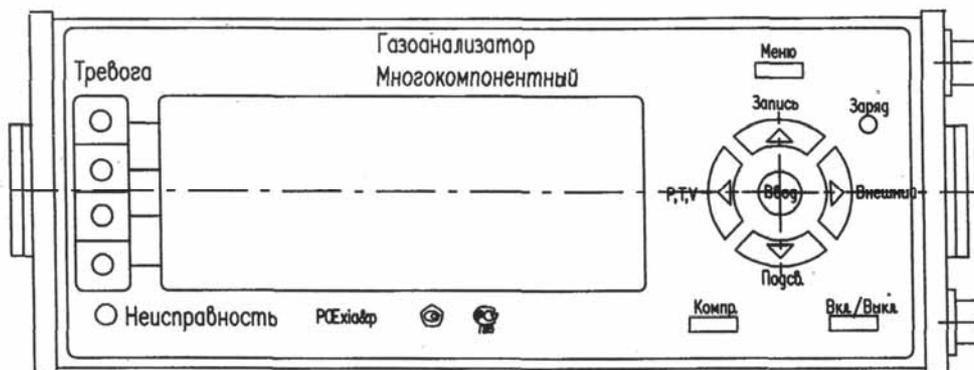


Рис. 2

Реальное разрешение будет несколько хуже из-за шумов в измерительном канале и сенсоре. Для уменьшения влияния шумов при необходимости можно использовать программные средства обработки, например, усреднение.

МГ может использоваться как в составе локальной системы контроля и сигнализации опасности и взрывоопасности шахтной атмосферы, так и автономно. Конструктивно МГ выполнен в виде переносного прибора (рис. 2).

Конструкция корпуса МГ обеспечивает возможность доступа к газовым датчикам для выполнения чистки или ремонта.

В МГ использованы два типа газовых датчиков:

- инфракрасные оптические датчики метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2);

- электрохимические датчики на кислород (O_2), монооксид углерода (CO) и водород (H_2) (производства «Alphasens» и «Оксоний»).

В оптических датчиках для увеличения стабильности нуля, а также для компенсации возможного влияния влаги, пыли и других факторов используется автокомпенсационная двухлучевая оптическая схема, в которой измеряется интенсивность двух лучей, проходящих по одному и тому же оптическому пути, причем, длина волны одного (измерительного) луча находится в области поглощения, а другого (опорного) – в области прозрачности определяемого газа.

Для компенсации влияния температуры и процессов старения фотоприемников и излучателей, используемых в датчике, в оптическую схему вводятся еще два луча, не проходящих сквозь анализируемый газ. В конструкцию оптических датчиков введено сферическое зеркало, позволившее при том же оптическом пути в два раза уменьшить габариты датчика.

Датчики обеспечивают одновременное измерение пяти газов в диапазонах концентраций, указанных в табл. 1

Функциональная схема многокомпонентного газоанализатора представлена на рис. 3.

Мобильная система оперативного контроля рудничной атмосферы состоит из соединенных посредством стандартного канала связи двух идентич-

ных по конструкции и программному обеспечению многоканальных газоанализаторов МГ. При соединении МГ, один из них выполняет функцию базового

Таблица 1

Диапазоны измерения и пределы допускаемой основной погрешности

Измеряемый параметр атмосферы	Концентрация, об.д. %, ppm	Основная погрешность измерения	
		абсолютная	относительная, %
Метан	(0,1 – 5)%	$\pm (0,1 + 0,04 C_x)\%$	-
	(5 – 30)%	$\pm 3\%$	-
Диоксид углерода	(0 – 2)%	$\pm (0,1 + 0,04 C_x)\%$	-
	(2 – 25)%	-	± 10
Водород	(0 – 4)%	$\pm (0,1 + 0,04 C_x)\%$	-
Монооксид углерода	(0-20)мг/м ³ (0 – 16) ppm	$\pm 5 \text{ мг/м}^3$	-
	(20-125)мг/м ³ (16 – 100) ppm	-	± 25
Кислород	(0,1 – 21)%	$\pm (0,4 + 0,02 C_x)\%$	-

C_x – значение концентрации определяемого компонента на входе газоанализатора

блока управления (MASTER), а второй – выносного датчика (SLAVE). Информационно базовый блок и выносной датчик объединены через стандартный канал связи RS-485. Многоканальные газоанализаторы МГ могут быть использованы как автономные переносные приборы с временем работы при нормальных условиях от полностью заряженного встроенного источника питания не менее 16 часов.

Многокомпонентные газоанализаторы в локальной мобильной системе оперативного контроля обеспечивают измерение параметров рудничной атмосферы автоматически или по команде. Результаты измерений должны записываться в память устройства с возможностью воспроизведения каждого записанного измерения на собственном цифровом индикаторе или по запросу передаваться в виде стандартного сигнала RS-485.

Алгоритм работы системы показан на рис. 4.

В функции **базового блока (MASTER)** входит:

- запрос вывод показаний выносного (SLAVE) датчика на дисплей базового;
- выдача световой и звуковой сигнализации при превышении концентраций в месте размещения выносных датчиков пороговых значений;
- периодическая прокачка объема датчиков (забор пробы) атмосферным воздухом и измерение концентрации метана, углекислого газа, кислорода, угарного газа, а также измерение температуры и давления окружающей среды;
- выработка световых и звуковых сигналов при превышении пороговых уровней концентраций;
- имеет нормально разомкнутые «сухие» контакты реле, замыкающиеся при превышении пороговых уровней концентрации;

В функции **выносного датчика (SLAVE)** входят:

- периодическая прокачка объема датчиков (забор пробы) атмосферным воздухом и измерение концентрации метана, углекислого газа, кислорода,

водорода, угарного газа, а также измерение температуры и давления окружающей среды;

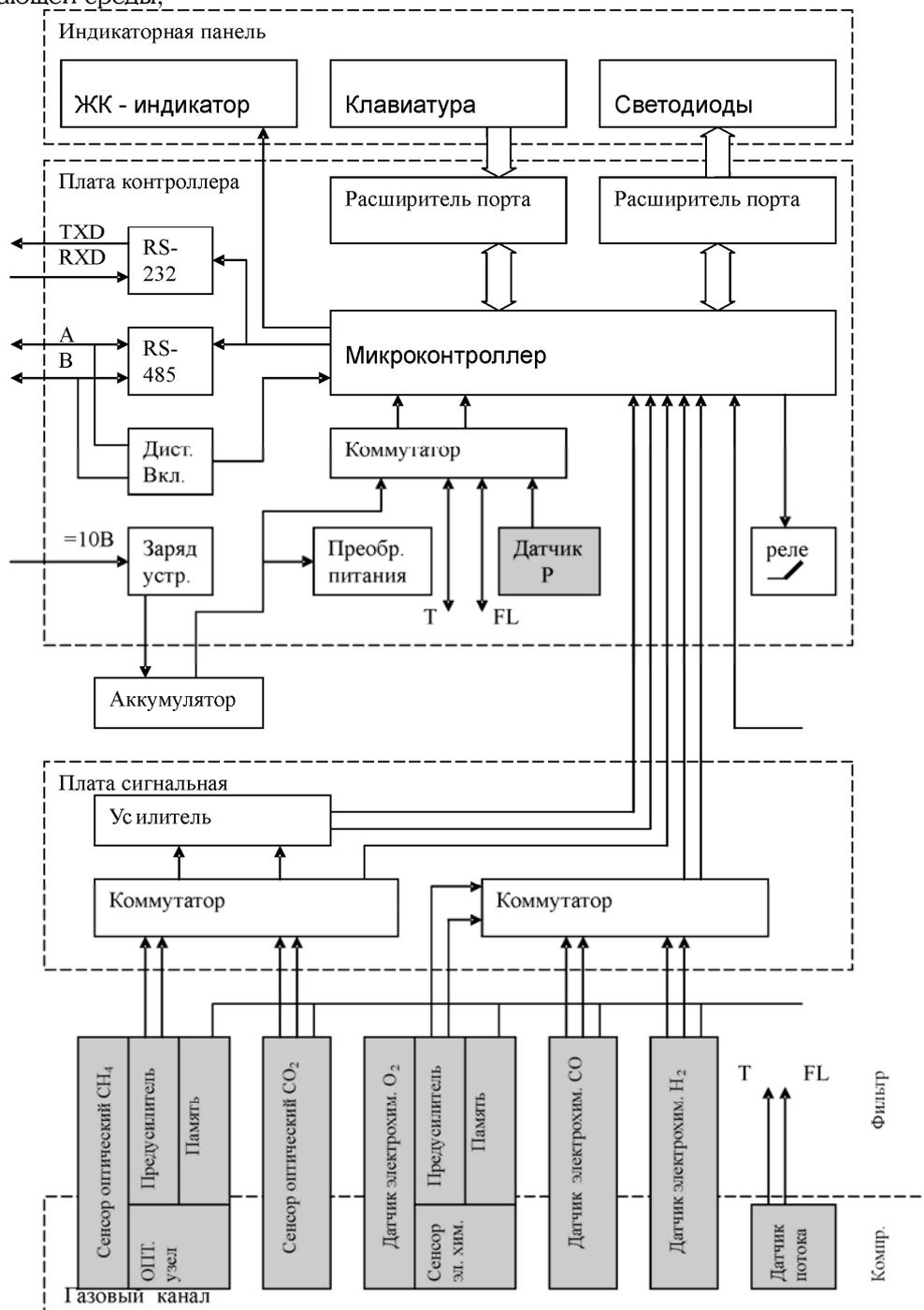


Рис. 3

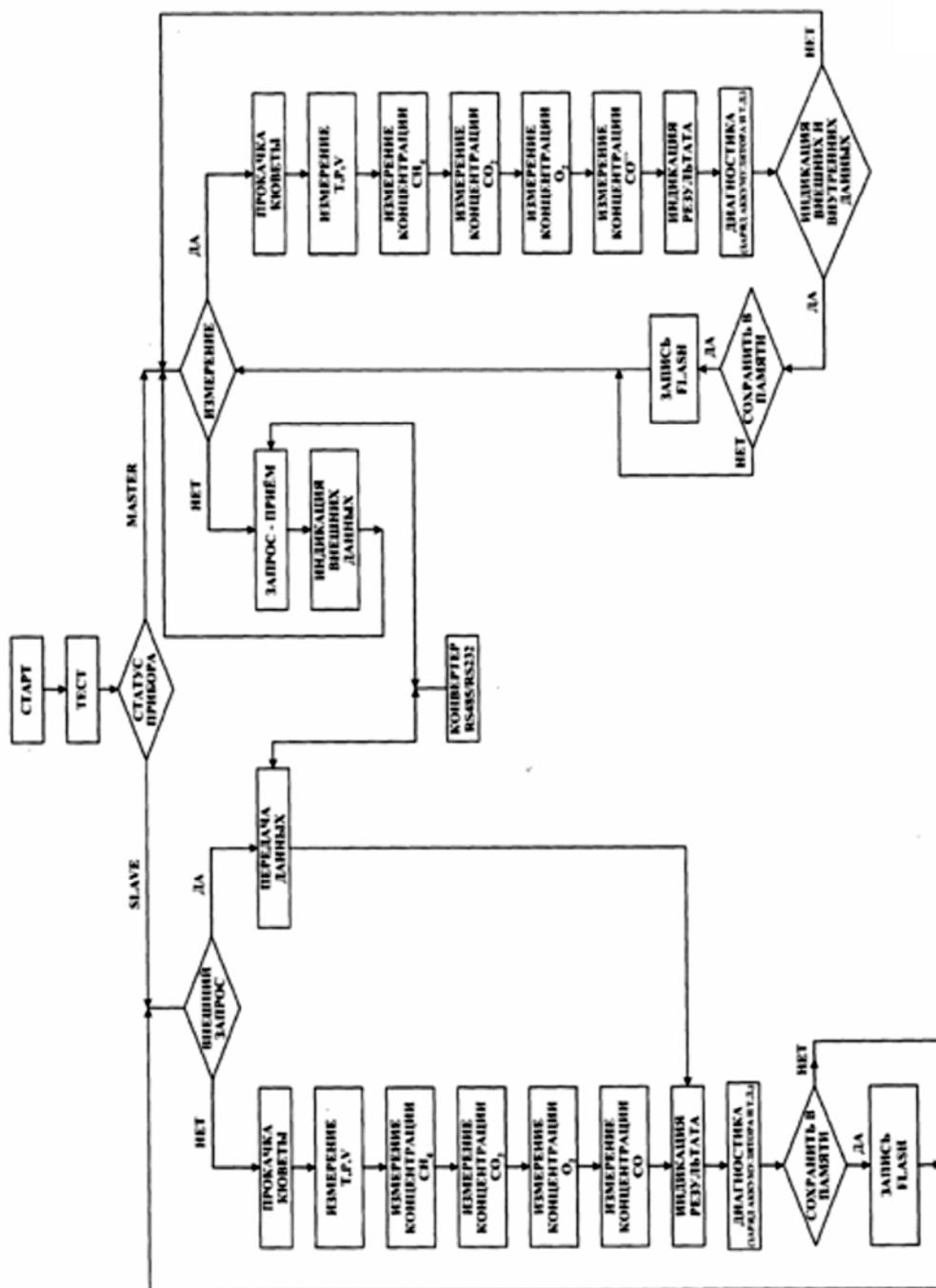


Рис. 4

- индикация результатов измерения на собственном индикаторе; выработка световых и звуковых сигналов при превышении пороговых i ;
- имеет нормально разомкнутые «сухие» контакты реле, замыкающиеся при превышении пороговых уровней концентрации;
- передача по запросу по стандартному каналу связи RS-485 текущих показаний на базовый блок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила безопасности в угольных шахтах* ПБ 05-618-03 изд. НТЦ Гостехнадзора, 2004.
2. *Клебанов Ф.С.* Воздух в шахте. "Имидж-Сет" М. 1995.
3. *Проспект* фирмы MSA, 2007, www.msa – russia.ru / production.
4. *Проспект* компании Trolex, 2007, www.promtex.ru/catalogue/trolex;
5. *Проспект* фирмы OLDHAM, 2008, http://www.intes.spb.ru
6. *Карпов Е.Ф., Биренберг И.Э.* Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. Москва, «Недра» 1984.
7. *Физические величины.* Справочник. Москва, ЭАИ, 1991.
8. *Гамарц Е.М., Крылов В.А.* Оптические газоанализаторы для безопасных технологий. Петербургский журнал "Электроника" № 1 2003.
9. *Проспект* фирмы General Monitors.
10. *Бреслер П.И.* Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение "Энергия", Ленинград, 1980. **ГАЗ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хиврин Михаил Васильевич – кандидат технических наук, hivrin@mail.ru
Кубрин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, ГИПРОУГЛЕАВТОМАТИЗАЦИЯ.
Гамарц Е.М., Раменский В.Б. – МЕТЕО.



О Т Р Е Д А К Ц И И

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 4, 2011 г. допущены опечатки:

Страница	Напечатано	Следует читать
165	© А.М. Мухаметшин, А.Г. Болгаров	© А.М. Мухаметшин, С.В. Поршнев
165	А.М. Мухаметшин, А.Г. Болгаров Разработка и применение геоинформационных систем для контроля состояния объектов строительства.	А.М. Мухаметшин, С.В. Поршнев Разработка и применение геоинформационных систем для контроля состояния объектов строительства
172	<i>Болгаров А.Г.</i> – Уральский государственный технический университет (УПИ).	<i>Поршнев С.В.</i> – доктор технических наук, зав. кафедрой, Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, академик Академии информатизации образования.
179	<i>Болгаров А.Г.</i> – Уральский государ-	<i>Болгаров А.Г.</i> – генеральный дирек-

	ственный технический университет (УПИ)	тор НПП «ИГИС»
--	---	----------------