

*А.К. Котляров, канд. техн. наук
(Украина, Конотоп, ОАО «Красный металлист»)*

*В.Е. Фрундин, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ МЕТАНА ОТ НЕИЗМЕРЯЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Среди технических средств, предназначенных для контроля состава и параметров рудничной атмосферы, важное место занимают приборы для определения содержания метана. Один их первых среди известных методов контроля концентрации метана, который нашел применение, - термокондуктометрический тепловой, основанный на измерении теплопроводности смеси [1,2,3]. Этот метод привлекает разработчиков аппаратуры простотой технических решений, но, к сожалению, неизбирателен. Поэтому впоследствии при разработке автоматических переносных и стационарных анализаторов метана, предназначенных для контроля состава атмосферы в горных выработках шахт, предпочтение стали отдавать термокаталитическому методу, для которого характерна большая избирательность и чувствительность к измеряемому компоненту [4,5]. Однако при измерении высоких концентраций метана в силу ряда причин предпочтительным является термокондуктометрический метод. Так, в настоящее время кондуктометрические газоанализаторы широко используют для непрерывного измерения концентрации метана в газовых смесях, отсасываемых дегазационными установками. Отечественным производителем таких средств является ОАО «Красный металлист», которым освоен выпуск аппаратуры АКРД с термокондуктометрическим датчиком метана ДМД, предназначенной для контроля за работой дегазационных систем. Следует отметить, что выпускаемой аппаратуре присущ ряд недостатков, заключающихся в существенном влиянии на результаты измерения давления, температуры, влажности и газового состава контролируемой среды. Вопросы, связанные с оценкой влияния указанных параметров газовой смеси и неизмеряемых компонентов на погрешность газоанализаторов, до настоящего времени изучены недостаточно.

Цель настоящей работы - теоретическая оценка погрешностей термокондуктометрических датчиков от неизмеряемых компонентов рудничной атмосферы: паров воды, углекислого газа, водорода и оксида углерода.

В работе [6] теоретическая оценка погрешностей датчика теплопроводности от неизмеряемых компонентов для шахтных условий эксплуатации производилась исходя из того, что теплопроводность смеси подчиняется аддитивному закону и электрические свойства молекул и влияние отличия молекулярных масс компонентов не учитывались. Явление теплопроводности в газовой смеси изучено еще недостаточно, а известные методы расчета несовершенны. Однако имеется [7,8] хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований теплопроводности газовой смеси и установлено, что су-

ущественное отклонение теплопроводности от закона аддитивности наблюдается для смесей, компоненты которых значительно отличаются по молекулярной массе (т.е. содержат водород или гелий) или полярности (т.е. содержат пары воды). Для расчета теплопроводности смеси газов, исходя из теплопроводности чистых газов, воспользуемся формулой Васильевой [7,8]

$$\lambda_{см} = \frac{\lambda_1}{1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1} + A_{13} \frac{x_3}{x_1} + \dots} + \frac{\lambda_2}{1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2} + A_{23} \frac{x_3}{x_2} + \dots} + \dots, \quad (1)$$

где $\lambda_{см}$ - коэффициент теплопроводности смеси, Вт/м·°С; $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ - коэффициенты теплопроводности компонентов смеси, Вт/м·°С; x_1, x_2, \dots - мольные (объемные) доли компонентов смеси; A_{12}, A_{13}, A_{21} - коэффициенты, зависящие от природы газов, образующих смеси.

Значения коэффициентов A определяем по формуле Сатерленда, скорректированной Линдсеем и Бромлеем:

$$A_{12} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_1}{\mu_2} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0,75} \frac{1 + \frac{C_1}{T}}{1 + \frac{C_2}{T}} \right]^{0,5} \right\}^2 \frac{1 + \frac{C_{12}}{T}}{1 + \frac{C_2}{T}}, \quad (2)$$

где μ_1, μ_2 - вязкость чистых газовых компонентов, м²/с; M_1, M_2 - молекулярные массы; C_1, C_2 - постоянные в уравнении Сатерленда (можно принять $C \approx 1,5T_{кип}$, где $T_{кип}$ - температура кипения, К); $C_{12} = f\sqrt{C_1 C_2}$, причем оба газа полярны или оба неполярны и $f = 0,733$, если один газ состоит из неполярных молекул, а второй - из сильно полярных.

Подставляя справочные данные из [7,9] в уравнения (1) и (2), определим значения коэффициентов теплопроводности смесей: метан - воздух, воздух - пары воды, метан - воздух - пары воды, метан - воздух - углекислый газ при температурах нити датчика 60, 120, 210, 320 и 400°С. Результаты расчета приведены в табл. 1-4. При расчете средняя температура смеси в камере датчика определялась по формуле

$$t_{см} = \frac{t_э + t_c}{2}, \quad (3)$$

где $t_э$ - температура термоэлемента, °С; t_c - температура стенок камеры, которую при расчете принимаем 20 °С.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента теплопроводности смеси метан-воздух

Объемная доля компонента смеси	x_1 (CH ₄)	0,0	0,01	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	x_2 (воздух)	1,0	0,99	0,95	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
Коэффициент теплопроводности смеси $\lambda \cdot 10^3$ Вт/м·°С, при температуре термозлемента, °С	60	26,90	26,998	27,387	28,826	30,698	32,517	34,282	36,00
	120	29,20	29,319	29,796	31,559	33,857	36,095	38,276	40,40
	210	32,65	32,807	33,431	35,745	38,766	41,714	44,591	47,40
	320	36,60	36,810	37,646	40,757	44,839	48,848	52,784	56,65
	400	39,40	39,652	40,667	44,437	49,389	54,257	59,044	63,75

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента теплопроводности смеси: воздух – пары воды

Объемная доля компонента смеси	x_1 (воздух)	0,97	0,94	0,9	0,7	0,6	0,4	0,0
	x_2 (пары воды)	0,03	0,06	0,1	0,3	0,4	0,6	1,0
Коэффициент теплопроводности смеси $\lambda \cdot 10^3$ Вт/м·°С, при температуре термозлемента, °С	60	26,991	27,057	27,108	26,794	26,320	24,840	20,10
	120	29,303	29,381	29,447	29,194	28,737	27,244	22,30
	210	32,838	32,917	33,018	33,018	32,647	31,265	26,25
	320	36,859	37,090	37,356	37,999	37,920	37,030	32,60
	400	39,822	40,214	40,690	42,312	42,678	42,587	39,40

Таблица 3

Результаты расчета коэффициента теплопроводности смеси: метан - воздух – пары воды

Объемная доля компонента смеси	x_1 (CH ₄)	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,9
	x_2 (воздух)	0,93	0,89	0,84	0,74	0,54	0,14	0,04
	x_3 (пары воды)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Коэффициент теплопроводности смеси $\lambda \cdot 10^3$ Вт/м·°С, при температуре термозлемента, °С	60	27,164	27,541	28,021	28,970	30,829	34,389	35,248
	120	29,499	29,974	30,563	31,729	34,016	38,414	39,478
	210	33,073	33,695	34,469	36,003	39,015	44,822	46,230
	320	37,299	38,136	39,180	41,244	45,323	53,315	55,200
	400	40,468	41,481	42,889	45,25	50,201	59,852	62,214

Анализ данных табл. 1 и 3 показывает, что с увеличением температуры нити датчика коэффициенты теплопроводности смесей метан-воздух и метан-воздух-пары воды не становятся соизмеримыми. Наоборот, разность коэффициентов теплопроводности увеличивается, при этом коэффициент теплопроводности смеси метан-воздух-пары воды больше коэффициента теплопроводности смеси метан-воздух. С целью выбора рационального температурного режима работы термокондуктометрического датчика, обеспечивающего минимальную погрешность измерения, произведем количественную оценку влияния паров воды и углекислого газа на выходной сигнал измерительного моста с термокондуктометрическим датчиком метана.

**Результаты расчета коэффициента теплопроводности смеси:
метан- воздух- углекислый газ**

Объемная доля компонента смеси	x_1 (CH ₄)	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,9
	x_2 (воздух)	0,97	0,93	0,88	0,78	0,58	0,18.	0,08
	x_3 (CO ₂)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02'	0,02
Коэффициент теплопроводности смеси $\lambda \cdot 10^3$ Вт/м·°С, при температуре термоэлемента, °С	60	26,769	27,155	27,627	28,583	30,439	33,997	34,854
	120	29,094	29,565	30,153	31,315	33,595	37,981	39,042
	210	32,584	33,204	33,972	35,501	38,499	44,283	45,686
	320	36,605	37,436	38,470	40,525	44,579	52,470	54,399
	400	39,465	40,472	41,725	44,216	49,135	58,728	61,076

Величина выходного сигнала неуравновешенного измерительного моста с термокондуктометрическим датчиком метана зависит от режима питания моста, параметров и температурного режима датчика, температуры и теплопроводности смеси, температурных коэффициентов сопротивления термоэлементов и теплопроводности газов, а также других факторов. Сложный характер зависимости выходного сигнала от указанных параметров не позволяет получить строгое математическое выражение, приемлемое для практического применения. Поэтому для оценки воспользуемся приближенным выражением, полученным в [2] для случая питания измерительного моста от источника стабильного тока, согласно которому выходной сигнал моста с датчиком теплопроводности может быть представлен как

$$A = K \frac{\lambda_{см} - \lambda_B}{\lambda_B \lambda_{см}}, \quad (4)$$

где K - коэффициент, зависящий от конструктивных параметров датчика, электрических характеристик нити и величины тока питания; $\lambda_B, \lambda_{см}$ - теплопроводность воздуха и анализируемой смеси при температуре, определенной по формуле (3).

Относительную погрешность датчика теплопроводности в общем виде можно представить так:

$$\delta A = \frac{A - A_0}{A_0} 100 \%, \quad (5)$$

где A - выходной сигнал датчика метана с учетом влияющего фактора; A_0 - выходной сигнал датчика в смеси метан - воздух.

Относительная и приведенная погрешности измерения датчика теплопроводности с учетом уравнений (5) и (6) соответственно будут:

$$\delta A = \frac{\lambda_B (\lambda_{см2} - \lambda_{см1})}{\lambda_{см2} (\lambda_{см1} - \lambda_B)} 100\%, \quad (6)$$

$$\delta A_{пр.} = \frac{\lambda_B \lambda_{CH_4} (\lambda_{см2} - \lambda_{см1})}{\lambda_{см1} \lambda_{см2} (\lambda_{CH_4} - \lambda_B)} 100\%, \quad (7)$$

где $\lambda_B, \lambda_{см1}, \lambda_{см2}, \lambda_{CH_4}$ - коэффициенты теплопроводности воздуха, смеси метан-воздух, смеси метан-воздух-неизмеряемый компонент и метана соответственно.

Подставляя данные из табл. 1,3,4 в уравнение (6) видим, что теоретическая относительная погрешность измерения метана датчиком теплопроводности при максимальном содержании паров воды равном 6 об.% (исходя из условий эксплуатации рудничных газоанализаторов) находится в пределах от 0,86 до 3,86 %, при этом погрешность возрастает с увеличением температуры нити датчика. При содержании 2об.% CO₂ в анализируемой смеси относительная погрешность измерения метана составляет от 1,14 до 3,37% и уменьшается с увеличением температуры нити датчика. Результаты расчета сведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Теоретическая приведенная погрешность измерения от паров воды при их содержании 6 об.%

Температура элемента, °С	Приведенная погрешность измерения при объемной доле метана, %							
	0,01	0,02	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
60	2,41	2,25	2,16	1,83	1,47	1,18	0,96	0,86
120	2,2	2,17	2,09	1,79	1,45	1,20	0,99	0,90
210	2,57	2,55	2,46	2,10	1,72	1,44	1,21	1,11
320	3,68	3,64	3,54	2,99	2,46	2,06	1,80	1,62

Таблица 6

Теоретическая приведенная погрешность измерения от углекислого газа при его содержании 2 об.%

Температура элемента, °С	Приведенная погрешность измерения при объемной доле метана, %							
	0,01	0,02	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
60	-3,37	-3,34	-3,32	-3,15	-2,95	-2,78	-2,61	-2,55
120	-2,78	-2,77	-2,75	-2,60	-2,43	-2,26	-2,14	-2,08
210	-2,19	-2,17	-2,15	-2,02	-1,83	-1,75	-1,64	-1,61
320	-1,57	-1,57	-1,54	-1,45	-1,35	-1,26	-1,17	-1,14

Анализ данных табл. 5 показывает, что исключить влияние паров воды и углекислого газа за счет выбора температуры нити термокондуктометрического датчика, как предлагается в работе [6], невозможно, однако установить рациональный тепловой режим работы датчика, обеспечивающий минимальную погрешность измерения от наличия паров воды и углекислого газа в анализируемой смеси, можно. Термокондуктометрические датчики метана обычно работают при температуре нити 120°С и имеют большую погрешность измерения от паров воды и углекислого газа. Повышение температуры нити датчика свыше

300°C, как показали экспериментальные исследования, нежелательно, так как при этом наблюдается окисление на ней метана. На основании этого и исходя из требования обеспечения экономичности датчика температуру нити термокондуктометрического датчика целесообразно принять в диапазоне 210-250°C.

Оценим влияние оксида углерода и водорода на выходной сигнал датчика теплопроводности, которые могут появиться в шахтной атмосфере при аварийных условиях [10].

Коэффициенты теплопроводности оксида углерода и воздуха незначительно отличаются друг от друга. Поэтому приведенная погрешность измерения датчика теплопроводности, определенная по формуле (7), при содержании 1 об.% CO в анализируемой смеси метан-воздух незначительна и составляет 0,1 %.

Коэффициенты теплопроводности водорода и воздуха значительно отличаются друг от друга. Расчеты теплопроводности смеси газов, содержащей водород, проведенные по формуле Брокау или эмпирическому уравнению Лемана [7], и определения погрешности измерения при содержании в смеси метан-воздух 1 об.% H₂, показали, что выходной сигнал датчика теплопроводности от содержания в анализируемой смеси 1 об.% H₂ в 7-8 раз больше, чем от 1 об.% CH₄.

На основании выполненных теоретических исследований датчика теплопроводности можно сделать вывод, что практическое значение имеют погрешности от паров воды и углекислого газа, а при аварийных условиях - от водорода.

Список литературы

1. Щербань А.Н., Фурман Н.И. Методы и средства контроля рудничного газа. – К.: Наукова думка, 1965. - 411 с.
2. Павленко В.А. Газоанализаторы. - М.-Л.: Машиностроение, 1965. - 296 с.
3. Айруни А.Т. Аппаратура техники безопасности за рубежом. - М.: ЦНИЭИуголь, 1970. – 81 с.
4. Карпов Е.Ф., Рязанов А.В. Автоматизация и контроль дегазационных систем. - М.: Недра, 1983. - 162 с.
5. Карпов Е.Ф., Биренберг И.Э., Басовский Б.И. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
6. Карпов Е.Ф., Рязанов А.В. Тепловой метод контроля концентрации метана в дегазационных трубопроводах // Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. - 1974. - Вып. 121. - С. 138-143.
7. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. - М.-Л.: Химия, 1966. – 535 с.
8. Цедерберг Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука, 1972. - 720 с.
10. Егоров В.А., Кондратенко И.Д. Концентрация газов и количественные их отношения в рудничном воздухе при пожарах, взрывах и внезапных выбросах угля и газа // Уголь Украины. - 1970. - № 1. - С. 46-48.