

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОДНОГО ИК-ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

М. С. АЛЕЙНИКОВ, Е. П. КОЛЬЦОВ, В. И. ЛУКОВНИКОВ,
К. Л. ПЕСТЕРЕВ, В. С. ТИТОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры приборов и устройств систем автоматики)

Способы ИК-газоанализаторов [1], основанные на определении концентрации за счет логарифмирования частного от деления (или разности) сигналов, пропорциональных мощностям ИК-поток, один из которых пропускается только через рабочую кювету с исследуемой средой, а второй — через кювету с исследуемой средой и эталонную кювету с предельной концентрацией измеряемого газа, могут быть реализованы с помощью газоанализатора, блок-схема которого изображена на рис. 1.

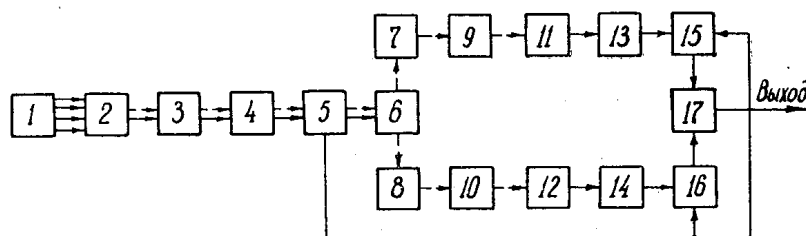


Рис. 1. Блок-схема газоанализатора.

С помощью передающей оптической системы 2 формируется коллимированный ИК-поток, испускаемый излучателем 1, который пропускается через рабочую кювету 4, модулируется модулятором 5 и делителем 6 разделяется на две части. Один из разделенных потоков пропускается через кювету с вакуумом (или с газом, не поглощающим ИК-поток в ИК-диапазоне), а второй — через эталонную кювету. Сфокусированные конденсорами 9 и 10 потоки воспринимаются фотоприемниками 11 и 12, выходные сигналы с которых поступают на усилители 13 и 14, а затем на синхронные детекторы 15 и 16, синхронизированные с модулятором 5. Выходной блок 17 осуществляет логарифмирование частного от деления (или разности) выходных сигналов синхронных детекторов 15 и 16.

Согласно рис. 1, выражение для статической характеристики устройства для случая, когда поток ИК-излучения коллимирован и равноэнергичен по сечению, а в качестве выходного блока 17 использован логарифмический делитель, нетрудно получить в виде

$$U_1 = K_{01} \ln \frac{K_{11} \cdot T_1}{K_{22} \cdot T_2}, \quad (1)$$

где U_1 — выходное напряжение газоанализатора;

K_{01} — коэффициент передачи логарифмического делителя;

K_{11} и K_{21} — коэффициенты передачи первого и второго каналов;

T_1 и T_2 — эквивалентные интегральные пропускания оптических устройств, соответствующие первому и второму каналам ИК-газоанализатора.

Величины, входящие в выражение (1), определяются по соотношениям:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \Phi_{\lambda_{\max 1}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_{61} \cdot \eta_7 \cdot \eta_9 \cdot \eta_{11} \cdot S_{\lambda_{\max 11}} \cdot K_{13} \cdot K_{15}; \\ K_{22} &= \Phi_{\lambda_{\max 1}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_{62} \cdot \eta_8 \cdot \eta_{10} \cdot \eta_{12} \cdot S_{\lambda_{\max 12}} \cdot K_{14} \cdot K_{16}; \\ T_1 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \cdot T_3(\lambda) \cdot T_4(\lambda) \cdot T_5(\lambda) \cdot T_{61}(\lambda) \cdot T_7(\lambda) \cdot T_9(\lambda) \cdot \sigma_{11}(\lambda) \cdot d\lambda; \\ T_2 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \cdot T_3(\lambda) \cdot T_4(\lambda) \cdot T_5(\lambda) \cdot T_{62}(\lambda) \cdot T_8(\lambda) \cdot T_{10}(\lambda) \cdot \sigma_{12}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

где η_i — коэффициент потерь, соответствующий i -ому оптическому блоку газоанализатора и определяемый неточным согласованием его входного зрачка с выходным зрачком предыдущего блока;

K_i — коэффициент передачи i -го электронного блока;

$S_{\lambda_{\max i}}$ — максимальная монохроматическая чувствительность приемника ИК-излучения;

$\Phi_{\lambda_{\max 1}}$ — максимальный монохроматический поток излучателя;

$\varphi(\lambda)$, $\sigma_i \lambda$, $T_i(\lambda)$ — относительные спектральные характеристики излучателя, приемника и пропускание i -го оптического блока соответственно.

Для второго случая, когда на выходе газоанализатора используется логарифмический сумматор, будем иметь

$$U_2 = K_{02} \ln(K_{12} \cdot T_1 - K_{22} \cdot T_2), \quad (3)$$

где K_{02} — коэффициент передачи логарифмического сумматора.

Сравнение методов анализа точности приборов [2] показывает, что наиболее близкую к действительной оценке общей погрешности прибора дает вероятностный метод анализа по сравнению со средне-квадратическим и методом максимума-минимума.

Однако простота метода максимума-минимума, оптимистичность получаемых результатов (расчетная погрешность всегда завышена по сравнению с действительной) приводят к широкому использованию данного метода в инженерной практике.

Из соотношений (1) и (3) по методу максимума-минимума получим расчетные формулы для предельных относительных погрешностей

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= |\delta K_{01}| + |\ln^{-1}[K_{11} \cdot T_1 (K_{21} \cdot T_2)^{-1}]| \cdot (|\delta K_{11}| + |\delta K_{21}| + \\ &\quad + |\delta T_1| + |\delta T_2|) + (\delta U_{01}); \\ \delta U_2 &= |\delta K_{02}| + |(K_{12} \cdot T_1 - K_{22} \cdot T_2)^{-1} \ln^{-1}(K_{12} \cdot T_1 - K_{22} \cdot T_2)| \cdot \\ &\quad \cdot (|K_{12} \cdot T_1 \delta K_{12}| + |K_{22} \cdot T_2 \delta K_{22}| + |K_{12} \cdot T_2 \delta T_1 - K_{22} \cdot T_2 \delta T_2|) + (\delta U_{02}), \end{aligned} \quad (4)$$

где δK_i — относительные погрешности коэффициентов передачи;

δU_{oi} — относительные погрешности, определяемые внутренними шумами прибора, дебалансом, дрейфом рабочих точек электронных блоков;
 δT_i — относительные погрешности интегрального пропускания оптических блоков.

Вычисление δK_i и δU_{oi} принципиальных затруднений не представляет. Так, например, δK_i можно получить суммированием относительных величин погрешностей составляющих параметров, согласно выражениям (2).

Для получения расчетного выражения δT_i проанализируем величины T_1 и T_2 , которые в соответствии с выражениями (2) можно представить в виде

$$\begin{aligned} T_1 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{01}(\lambda) \cdot T_3'(\lambda) \cdot T_7'(\lambda) d\lambda; \\ T_2 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{01}(\lambda) \cdot T_3'(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_3'(\lambda)$ и $T_7'(\lambda)$ — относительные спектральные пропускания газа в рабочей и эталонной кюветах, без учета спектрального пропускания стенок кюветы;

$T_{01}(\lambda)$ — эквивалентная относительная спектральная характеристика, определяемая характеристиками источника, приемника ИК-излучения и материалов оптических элементов и не зависящая от состава анализируемой газовой смеси.

По закону Бугера [3], не учитывая за малостью аэрозольное поглощение и рассеяние, а также рассеяние Рэлея и от турбулентности, спектральное пропускание для однородной среды рабочей и эталонной кюветы можно получить

$$\begin{aligned} T_3'(\lambda) &= \exp \left[- \sum_{i=1}^n \beta_i(\lambda) \cdot W_i^* \right] \exp [\beta_i(\lambda) \cdot W_x^*]; \\ T_7'(\lambda) &= \exp [-\beta_x(\lambda) \cdot W_{x\text{эт}}], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\beta_x(\lambda)$ и $\beta_i(\lambda)$ — относительные спектральные коэффициенты поглощения на единицу эквивалентной массы W^* исследуемого и W_i постороннего i -го газа в анализируемой среде;

$W_{x\text{эт}}$ — эквивалентная масса исследуемого газа в эталонной кювете.

Учитывая (5) и (6), из (4) получим:

$$\begin{aligned} \beta T_1 &= T_1^{-1} \left[T_{01}^{-1} \frac{\partial T_1}{\partial T_{01}} \cdot \delta T_{01} + (W_i^*)^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial W_i^*} + \right. \\ &+ (W_{x\text{эт}}^*)^{-1} \frac{\partial T_1}{\partial W_{x\text{эт}}^*} \delta W_{x\text{эт}}^* + (W_x^*)^{-1} \frac{\partial T_1}{\partial W_x^*} \delta W_x^* \left. \right]; \\ \delta T_2 &= T_2^{-1} \left[T_{02}^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial T_{02}} \cdot \delta T_{02} + (W_i^*)^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial W_i^*} \delta W_i^* + \right. \\ &+ (W_x^*)^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial W_x^*} \delta W_x^* \left. \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения (2, 4, 7) могут быть использованы для расчета общей погрешности описанного ИК-газоанализатора для обоих вариантов исполнения его выходного блока.

Проведем сравнение вариантов исполнения газоанализатора по величине их методических погрешностей, расчетное выражение получается из (5) и (7) при $K_{11}=K_{12}$, $\delta K_i = \delta U_{0i} = 0$, W^* , W_i^* — const и неизменных функциях $T_{01}(\lambda)$.

$$\delta U_{1M} = \ln^{-1}(T_1 \cdot T_2^{-1}) \left[T_1^{-1} \frac{\partial T_1}{\partial W_1^*} \Delta W_i^* - T_2^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial W_i^*} \Delta W_i^* \right]; \quad (8)$$

$$\delta U_{2M} = \ln^{-1}(T_2 - T_1) (T_2 - T_1)^{-1} \frac{\partial T_1}{\partial W_i^*} \Delta W_i^* - (T_2 - T_1)^{-1} \frac{\partial T_2}{\partial W_i^*} \Delta W_i^*.$$

Поскольку в соответствии с формулой (5) T_1 и T_2 представляют собой неберущиеся интегралы, то для удобства расчета целесообразно приближенно заменить их суммой

$$T_1 = \sum_{m=1}^q T_{01}(\lambda) \exp \left[- \sum_{i=1}^n \beta_i(\lambda_{0m}) \cdot W_i^* \right] \exp [- \beta_x(\lambda_{0m}) W_x^*] \times$$

$$\times \exp [- \beta_x(\lambda_{0m}) \cdot W_{x\text{эт}}^*];$$

$$T_2 = \sum_{m=2}^q T_{02}(\lambda) \cdot \exp \left[- \sum_{i=1}^n \beta_i(\lambda_{0m}) \cdot W_i^* \right] \exp [- \beta_x(\lambda_{0m}) \cdot W_x^*],$$

где q — число разных отрезков $\Delta\lambda$, на которые разбивается интервал $\lambda_1 \div \lambda_2$;

λ_{0m} — середина m -го отрезка $\Delta\lambda$.

По выражению (8) был произведен расчет методических ошибок. Причем эквивалентные спектральные пропускания T_1 и T_2 определялись по выражениям (9).

Расчет производился для анализируемой смеси газов, представленной в табл. 1, причем определяемым газом считалась окись углерода CO.

Т а б л и ц а 1

№№ п/п.	Наименование веществ	Концентра- ция С, г/см	Удельный вес, г/см ³	Эквива- лентная масса, ат·см	Коэффи- циент самоуши- рения	Примечание
1	Двуокись углерода (CO) ₂	1,9·10 ⁻⁷	1,98·10 ⁻³	1,005	2,0	Т=20°С
2	Пары воды Н ₂ О	0,17·10 ⁻⁴	1,0 (вода)	0,01 ÷ 0,02	6	
3	Закись азота	2·10 ⁻⁸	1,97·10 ⁻³	0,016	1,29	Р ₀ =760 мм. рт. ст.
4	Метан СН ₄	0,1·10 ⁻⁸	0,72·10 ⁻³	0,006	1,3	
5	Угарный газ СО	2·10 ⁻⁸	1,25·10 ⁻³	0,25 0,25 2,5	1,05	

Расчет W_i^* и определение $\beta_i(\lambda)$ производились в соответствии с рекомендациями работы [3].

Относительная спектральная интенсивность $\varphi(\lambda)$ излучателя принималась равной спектральной характеристике абсолютно черного тела при температуре 800°К, а относительные спектральные пропускания оп-

тических блоков $T_i(\lambda)$, с целью упрощения расчетов методических погрешностей,— единице. Относительная спектральная чувствительность $\sigma(\lambda)$ приемника соответствовала характеристике фотосопротивления СФ4-1.

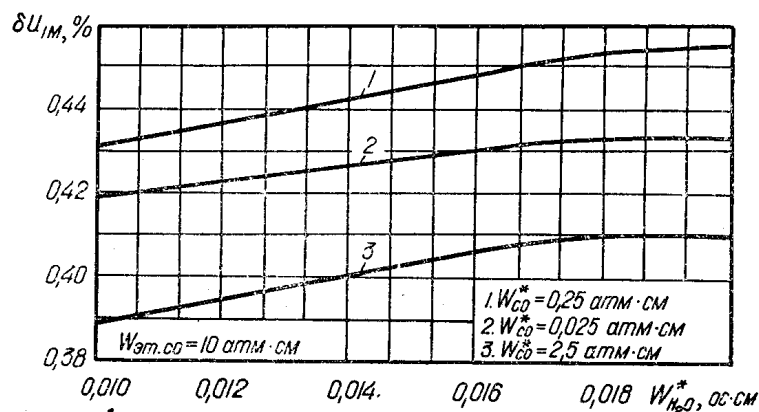


Рис. 2. Зависимость методической погрешности от концентрации угарного газа.

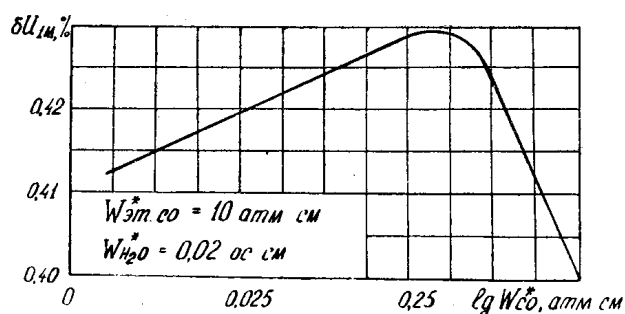


Рис. 3. Зависимость методической погрешности от концентрации паров воды.

Анализ результатов расчета и полученных зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, показал, что величина $\delta U_{2m} \approx 0$, а δU_{1m} не превышает 0,5% при изменении относительной влажности от 50 до 98% для 100-кратного увеличения концентрации исследуемого газа (CO), начиная с $2 \times 10^{-8} \text{ г/см}^3$, причем с увеличением концентрации водяного пара δU_{1m} увеличивается, а с увеличением концентрации окиси углерода CO уменьшается. Наиболее сильное влияние на погрешность измерения концентрации CO оказывают полосы поглощения ИК-излучения парами воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Алейников и др. Способ определения концентрации газов и устройство его реализующее. В настоящем сборнике.
2. В. И. Памиура. Сравнение методов анализа погрешности. В сб.: «Повышение точности и автоматизация электрических и магнитных измерительных устройств». Киев, «Наукова Думка», 1968, 9.
3. В. Е. Зуев. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере, М., «Советское радио», 1970.
4. Н. И. Москоленко, Б. М. Голубицкий. Физика атмосферы и океана. «Наука», 1968. 3, 4, 7, 9.