

## УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА ДЛЯ СЛУЧАЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Вопрос достоверности учета количества газа является основным для обеспечения качественного контроля передачи газа, который поставляется потребителям и транспортируется по газотранспортной системе Украины. Поэтому НАК “Нафтогаз України” уделяет большое внимание вопросам обеспечения достоверности и повышения точности учета количества газа путем разработки новых и усовершенствования существующих методов контроля газовых потоков [1].

В статье [2] были изложены предпосылки разработки и общие вопросы использования оптических явлений, позволяющие реализовать бесконтактный оптический метод контроля газовых потоков в трубопроводах. На основе анализа дисперсионных процессов, имеющих место в газовой среде при прохождении через нее электромагнитных волн, получено аналитическое выражение, которое связывает показатель преломления газовой среды с параметрами состояния газовой среды (температура, давление):

$$n^2 = 1 + \frac{p}{T} \cdot \frac{e^2 / m}{\varepsilon_0 \cdot k_0} \cdot \sum_k \frac{1}{\omega_{0k}^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления газовой среды;  $p$  – давление газовой среды;  $T$  – температура газовой среды;  $e$  – заряд электрона;  $m$  – масса электрона;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $k_0$  – постоянная Больцмана;  $\omega_{0k}$  – собственные частоты колебания электронов компонентов газовой среды;  $\omega$  – частота электромагнитного излучения;  $k$  – количество собственных частот колебания электронов компонентов газовой среды.

Уравнение (1) позволило графически представить зависимости показателя преломления газовой среды от температуры и давления в случае однокомпонентной и многокомпонентной газовой среды. Полученные результаты позволили сделать вывод, что для многокомпонентной газовой среды общий характер зависимости сохраняется, что позволяет использовать в этом случае уравнение (1).

В процессе исследований была разработана схема экспериментальной установки на основе интерферометра Жамена и получены экспериментальные значения показателя преломления газовой смеси при различных значениях давления. Уравнение измерения при проведении экспериментальных исследований имело вид:

$$(n_2 - n_1) \cdot L = m \cdot \lambda_0, \quad (2)$$

где  $n_2$  и  $n_1$  – показатели преломления контролируемой газовой среды и воздуха, соответственно;  $L$  – геометрическая длина пути луча в газовой среде;  $m$  – число интерференционных полос;  $\lambda_0$  – длина волны излучения в вакууме.

Хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными данными в диапазоне давлений от 1 до 2 атм и при температуре 26 °С (относительное расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышало 0,01 % [2]) подтвердило адекватность полученных теоретических соотношений. В статье [2] не была решена проблема оценки влияния параметров модели на точность результата. В данной статье проведен анализ модели с целью выяснения степени влияния неоднородности состава газовой смеси на точность результата и определения значений оптимальных параметров модели.

Для исследования степени влияния параметров уравнения (1) на точность определения показателя преломления газовой смеси необходимо рассчитать коэффициенты влияния параметров уравнения и провести сравнительный анализ составляющих погрешностей. Для этого представим уравнение (1) в следующем виде:

$$n = \sqrt{1 + \frac{p}{T} \cdot K}, \quad (3)$$

где  $K = \frac{e^2 / m}{\epsilon_0 \cdot k_0} \cdot \sum_k \frac{1}{\omega_{0k}^2 - \omega^2}$  – коэффициент, определяемый собственными частотами колебаний электронов компонентов газовой среды под действием электромагнитного поля и влияющий на фазовую скорость электромагнитной волны.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) определения показателя преломления газовой смеси  $S(n)$  из уравнения (1) по результатам экспериментальных исследований вычисляется в соответствии с формулой:

$$S(n) = \sqrt{S(p)^2 + S(T)^2 + S(K)^2} = \sqrt{(W_p \cdot S_p)^2 + (W_T \cdot S_T)^2 + (W_K \cdot S_K)^2}, \quad (4)$$

где  $S(p)^2$ ,  $S(T)^2$  и  $S(K)^2$  – составляющие результирующего СКО за счет погрешности определения давления, температуры и коэффициента  $K$ , соответственно;  $W_p, W_T, W_K$  – коэффициенты влияния погрешности определения давления, температуры и коэффициента  $K$ , соответственно, представляющие собой первые производные от функции  $n$  по каждому исследуемому параметру;  $S_p, S_T, S_K$  – СКО определения давления, температуры и коэффициента  $K$ , соответственно.

Составляющие  $S(p)^2$ ,  $S(T)^2$  и  $S(K)^2$  при условиях эксперимента ( $t=26$  °С,  $p=1$  атм) и компонентном составе газовой смеси, которая использовалась при исследованиях (метан (94,028 %), этан (3,227 %), пропан (0,657 %), бутан (0,206 %), пентан (0,069 %), гексан (0,127 %), азот (1,439 %), диоксид углерода (0,241 %), кислород (0,006 %) по данным предприятия “Харківтрансгаз”), принимают значения:

$$S(p)^2 = \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{T} \cdot K\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{K}{T} \right)^2 \cdot S_p^2 = 2,0394 \cdot 10^{-18},$$

$$S(T)^2 = \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{T} \cdot K\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{p \cdot K}{T^2} \right)^2 \cdot S_T^2 = 2,3342 \cdot 10^{-14},$$

$$S(K)^2 = \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{T} \cdot K\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{p}{T} \right)^2 \cdot S_K^2 = 3,9049 \cdot 10^{-10}.$$

Исходя из рассчитанных значений составляющих СКО, можно сделать вывод, что доминирующей является составляющая  $S(K)^2$ , зависящая от неточности определения компонентного состава газовой смеси. Составляющая  $S(p)^2$  имеет пренебрежимо малое значение по сравнению с  $S(T)^2$  и  $S(K)^2$ , поэтому при дальнейшем анализе ее можно исключить из рассмотрения.

Условием, при котором коэффициент  $K$  можно определять, не учитывая многокомпонентный состав смеси, является пренебрежимо малая величина  $S(K)^2$  по сравнению с  $S(T)^2$  в диапазоне давлений ( $\frac{S(T)}{S(K)} > 3$ ). При выполнении этого условия графики зависимостей  $S(T)^2$  и  $S(K)^2$  от значений  $p$  и  $S_k$  принимают вид (рис. 1).

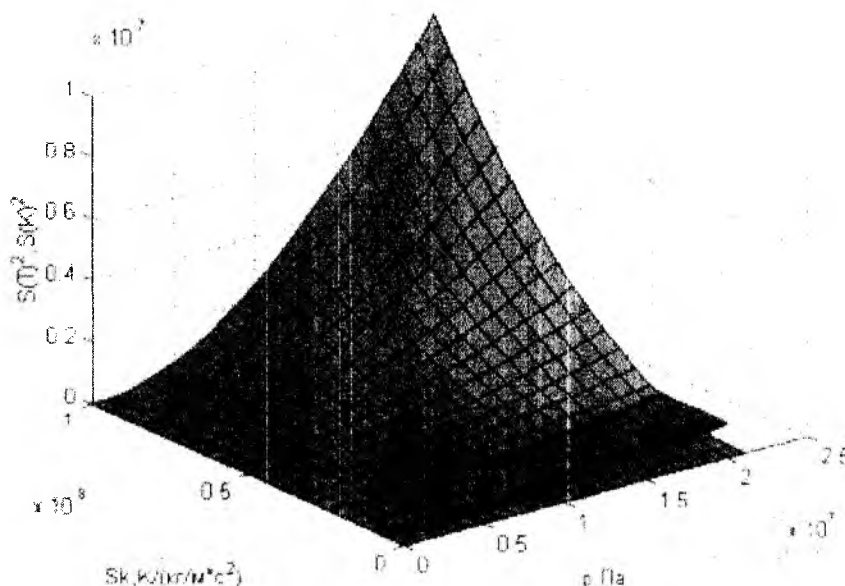


Рис. 1

Таким образом, для газовой смеси с преобладанием метана, находящейся в нормальных условиях, при  $S_K^2 = 0,2893 \cdot 10^{-16} \frac{K^2}{\text{кг}^2 / \text{м}^2 \cdot \text{с}^4}$  коэффициент  $K$  можно определять, не учитывая многокомпонентный состав смеси. Такое значение  $S_K^2$  соответствует составу смеси, при котором отличие молекулярной рефракции смеси от молекулярной рефракции чистого метана не превышает  $\pm 0,0198\%$ .

Следовательно, при использовании уравнения (1) для контроля расхода метановых газовых смесей рассчитано предельное отклонение молекулярной рефракции смеси от молекулярной рефракции метана, при которых влияние неоднородности состава смеси на результат измерения пренебрежимо мало, и расчеты могут проводиться, исходя из допущения чистого метана.

С целью достижения требуемой точности измерения необходимо рассмотреть вопрос определения оптимальных значений неинформативных параметров уравнения проведенного эксперимента (2).

Основными неинформативными параметрами, выбор которых оказывает непосредственное влияние на точность измерений, являются:

1)  $\lambda_0$  при заданном  $L$ ;

2)  $K_L$  при заданном  $L$ , где  $K_L$  – коэффициент, характеризующий оптическую разность хода, которая возникает вследствие разности показателей преломления по ходу двух лучей интерферометра вне газовой среды;  $K_L = n'_2 \cdot L_2 - n'_1 \cdot L_1$ , где  $n'_1, n'_2$  – показатели преломления вне газовой среды по ходу первого и второго луча, соответственно;  $L_1, L_2$  – геометрические длины путей вне газовой среды по ходу первого и второго луча, соответственно.

Для определения допустимых значений  $\lambda_0$  и  $K_L$  при заданном  $L$  необходимо проанализировать уравнение (2) с точки зрения влияния данных параметров на результирующую погрешность измерения в соответствии с формулой [3]:

$$S(n_2)^2 = \sum_{i=1}^l W_i^2 \cdot S_i^2. \quad (5)$$

После определения коэффициентов влияния для нахождения допустимых значений  $\lambda_0$  при заданном  $L$ , получим следующее выражение:

$$S(n_2) = \sqrt{\frac{m^2}{L^2} \cdot S_{\lambda_0}^2 + \frac{\lambda_0^2}{L^2} \cdot S_m^2 + \frac{\lambda_0^2 \cdot m^2}{L^4} \cdot S_L^2 + S_{n_1}^2}. \quad (6)$$

Исходя из уравнения (6) и физического смысла соотношения  $\frac{\lambda_0}{L}$  аналитически диапазон допустимых значений  $\lambda_0$  при заданном  $L$  может быть представлен неравенством:

$$\lambda_0 \leq \sqrt{\frac{(S(n_2)^2 - S_{n_1}^2) \cdot L^4 - m^2 \cdot S_{\lambda_0}^2 \cdot L^2}{S_m^2 \cdot L^2 + m^2 \cdot S_L^2}}. \quad (7)$$

Полученная зависимость (7) позволяет определить критическое значение длины волны излучения. При выполнении неравенства (7)  $S(n_2)$  при остальных фиксированных параметрах не будет превышать заданное значение.

Для значений СКО, полученных в результате экспериментальных исследований ( $S(n_2) \leq 0.5 \cdot 10^{-6}$ ;  $0.4 \cdot 10^{-6}$ ;  $0.3 \cdot 10^{-6}$ ), на рис. 2 представлены номограммы, по которым определяется критическое значение  $\lambda_0$  для данного  $L$ .

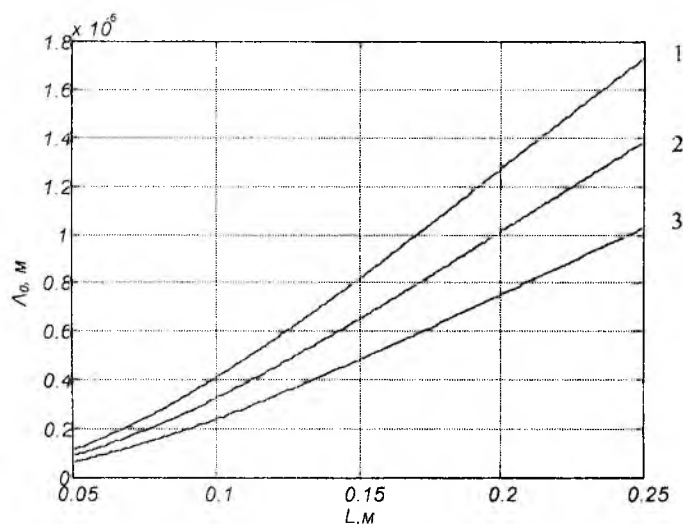


Рис. 2

Для определения критического значения  $K_L$  при заданном  $L$  в уравнение (6) необходимо добавить еще один член, учитывающий оптическую разность хода, которая возникает вследствие разности показателей преломления по ходу двух лучей интерферометра вне газовой среды. После преобразований уравнение (6) будет иметь вид:

$$S(n_2) = \sqrt{\frac{m^2}{L^2} \cdot S_{\lambda_0}^2 + \frac{\lambda_0^2}{L^2} \cdot S_m^2 + \left(\frac{K_L}{L^2} - \frac{\lambda_0 \cdot m}{L^2}\right) \cdot S_L^2 + S_{n_1}^2 + \frac{1}{L^2} \cdot S_{K_L}^2}. \quad (8)$$

Учитывая уравнение (8), критическое значение коэффициента  $K_L$  при заданном  $L$  аналитически может быть представлено неравенством:

$$K_L \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3S_L^2 + L^2} \cdot \left( 6S_L^2 \cdot \lambda_0 \cdot m + 2 \cdot \begin{pmatrix} -9S_L^2 \cdot m^2 \cdot S_{\lambda_0}^2 \cdot L^2 - 9S_L^2 \cdot \lambda_0^2 \cdot S_m^2 \cdot L^2 + 9S_L^2 \cdot S(n_2)^2 \cdot L^4 - 9S_L^2 \cdot S_{n_1}^2 \cdot L^4 - \\ -3L^4 \cdot m^2 \cdot S_{\lambda_0}^2 - 3L^4 \cdot \lambda_0^2 \cdot S_m^2 - \\ -3L^2 \cdot S_L^2 \cdot \lambda_0^2 \cdot m^2 + 3L^6 \cdot S(n_2)^2 - \\ -3L^6 \cdot S_{n_1}^2 \end{pmatrix} \right) \quad (9)$$

Для значений СКО ( $S(n_2) \leq 0.6 \cdot 10^{-6}; 0.5 \cdot 10^{-6}; 0.4 \cdot 10^{-6}$ ) на рис. 3 представлены номограммы, по которым определяется критическое значение  $K_L$  для данного  $L$ .

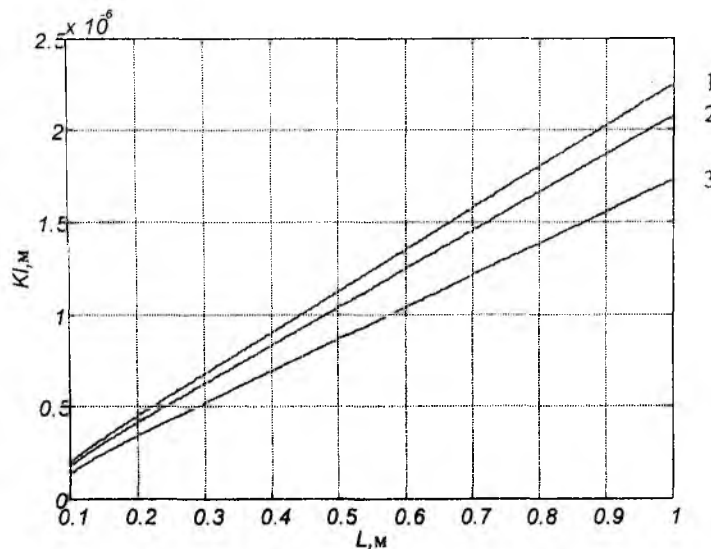


Рис. 3

Общий вид графиков (рис. 2, 3) позволяет сделать вывод, что с увеличением геометрической длины пути луча в газовой среде при заданном значении СКО результата измерения менее жесткими становятся требования, накладываемые на значения  $\lambda_0$  и  $K_L$ , необходимые для достижения требуемой точности.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили уточнить особенности реализации разработанной модели измерения, учитывая влияние степени неоднородности контролируемой газовой смеси и определяя допустимые значения неинформативных параметров модели для достижения требуемой точности измерения.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении видятся авторам в разработке и аппаратной реализации метода оптического бесконтактного контроля газовых потоков, в основу которого положена описанная модель взаимодействия газовой смеси с электромагнитными волнами оптического диапазона.

**Список литературы:** 1. *Розгонюк В. В.* Технічна політика НАК "Нафтогаз України" в галузі газовимірювання // Вимірювання витрати та кількості газу і нафтопродуктів: Матеріали конференції. Івано-Франківськ: Факел, 2003. С. 3-9. 2. *Мощенко И. А.* Применение оптического интерферометра для бесконтактного измерения расхода промышленного природного газа // АСУ и приборы автоматики. 2004. № 126. С. 52-56. 3. *Земельман М. А.* Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 227 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 15.07.2004*