

УДК 621.376:536.89

Г.Ф. Коняхин, С.А. Косиков

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В статье проанализировано влияние локальных изменений плотности газовых сред, возникающих в результате возбуждения в них высокочастотных механических колебаний, на коэффициент преломления. Получены формулы для оценки изменения величины коэффициента преломления на границе раздела объект – газовая среда.*

**Ключевые слова:** механические колебания, газовая среда, оптическое излучение, коэффициент преломления.

### Введение

**Постановка проблемы.** Оптические методы измерения, основанные на определении разности фаз двух интерферирующих волн оптического излучения (опорного и сигнального), нашли широкое применение в промышленности как средство контроля в ходе выполнения некоторых технологических процессов, а также при проведении прикладных исследований. Наличие случайной оптической неоднородности при прохождении опорного или сигнального оптических излучений изменяет оптическую длину пути, что в ряде случаев приводит к серьезным погрешностям измерений. Причинами появления таких неоднородностей являются изменение температуры, изменение показателей преломления оптических элементов приборов, механические и акустические колебания. При проведении измерений параметров механических колебаний различных объектов следует учитывать влияние самого вибрирующего объекта на среду, в которой он расположен. Частотный диапазон механических колебаний при исследовании в газовых средах достигает  $10^9$  Гц, при этом, ввиду большого затухания, плотность газовой среды при удалении от вибрирующего объекта стремится к значению, равному плотности невозбужденной среды. В свою очередь, изменение плотности среды приводит к изменению коэффициента преломления и соответственно к изменению оптической длины пути, что приводит к погрешности при измерении разности фаз.

**Анализ публикаций.** В работе [1] излагается теория распространения механических и электромагнитных колебаний в слоистых средах. В некоторых работах проводится анализ факторов, влияющих на результаты измерений перемещений исследуемого объекта. В частности, в [2, 3] отмечается влияние температуры, давления и состояния газовой среды, в которой расположен исследуемый объект, на точность измерений. В [4] рассмотрены вопросы,

относящиеся к обработке результатов измерений амплитуды быстропеременных процессов. В [2] предлагаются некоторые рекомендации по устранению влияния факторов на точность измерений. Из рассмотрения этих работ следует, что одним из основных направлений исследований в области оптических измерений, является поиск способов устранения флуктуаций оптической длины пути, а также поиск наиболее простых средств обработки результатов измерений, обладающих достаточной простотой для практического применения. Однако все эти направления не полностью отображают результаты исследования в области высокочастотных механических колебаний объектов.

**Целью данной работы** является оценка влияния высокочастотных механических колебаний объекта на величину коэффициента преломления воздействующего оптического излучения.

### Основная часть

Разность фаз  $\Delta\varphi$  двух интерферирующих волн (опорной и сигнальной), имеющих одинаковые начальные фазы, может быть определена из формулы [5]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(l_1n_1 - l_2n_2)}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны оптического излучения в вакууме;

$l_1, l_2$  – расстояния, проходимые первой и второй волнами;

$n_1, n_2$  – коэффициенты преломления сред, проходимых соответственно опорным и сигнальным оптическими излучениями.

Зависимость коэффициента преломления газовой среды от ее плотности определяется законом Лоренц-Лоренца [5]. В соответствии с этим законом

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = R, \quad (2)$$

где  $n$  – коэффициент преломления газовой среды;  
 $\rho$  – плотность газовой среды;  
 $R$  – удельная молекулярная рефракция газовой среды.

Решая уравнение (2) относительно  $n$ , получим

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2R\rho}{1 - R\rho}}. \quad (3)$$

В соответствии с [6] изменение плотности газовой среды при прохождении волны механических колебаний составляет

$$\Delta\rho = -\frac{\rho_0 \varepsilon}{1 + \varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\Delta\rho$  – изменение плотности газовой среды;

$\rho_0$  – плотность невозмущенной газовой среды;

$\varepsilon$  – деформация объема газовой среды.

Пусть смещение исследуемого объекта вдоль оси  $x$  происходит в соответствии с законом

$$\xi(x, t) = \xi_0 e^{-\alpha x} \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x), \quad (5)$$

где  $\xi_0$  – амплитуда смещения;

$\alpha$  – коэффициент затухания механических колебаний в газовой среде;

$f$  – частота механических колебаний;

$\lambda_m$  – длина волны механических колебаний;

$t$  – время.

Тогда деформация элементарного объема газовой среды составит

$$\varepsilon(x, t) = \frac{d\xi(x, t)}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x). \quad (6)$$

С учетом (4) и (6) выражение для мгновенного значения плотности  $\rho(x, t)$  при начальном значении плотности  $\rho_0$  после преобразования примет вид

$$\rho(x, t) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x)}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), выражение для  $n(x, t)$  после преобразования будет иметь вид

$$n(x, t) = \sqrt{\frac{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x) + 2R\rho_0}{1 + \frac{2\pi}{\lambda_m} \xi_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda_m} x) - R\rho_0}}. \quad (8)$$

С помощью полученного выражения можно определить значение коэффициента преломления газовой среды в локальной области на границе раздела объект – газовая среда с учетом коэффициента затухания  $\alpha$ . Кроме того, путем интегрирования выражения (8) по  $dx$  и по  $dt$  соответственно, можно определить зависимость величины оптической длины пу-

ти  $L(x)$  и  $L(t)$  для фиксированных значений  $t$  и  $x$ .

На рис. 1, 2 приведены графики зависимостей  $\rho(x)$  и  $n(x)$  для  $\lambda = 589$  нм, частоты механических колебаний  $f = 5 \cdot 10^5$  Гц,  $\xi_0 = 10^{-6}$  м,  $\rho_0 = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>, полученные по формуле (8).

Для рассматриваемого случая предел  $n(x)$  при  $x \rightarrow \infty$  равен

$$\lim_{x \rightarrow \infty} n(x) = 1,00029. \quad (9)$$

Величина оптического пути  $L(x)$  с учетом условия (9) может быть представлена в виде

$$L(x) = \int_0^{\infty} n(x) dx. \quad (10)$$

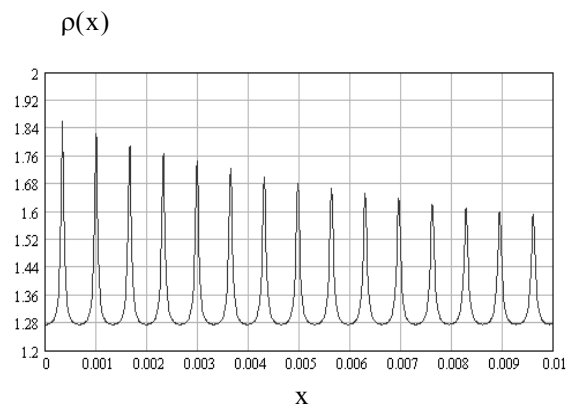


Рис. 1. График изменений плотности газовой среды  $\rho(x)$

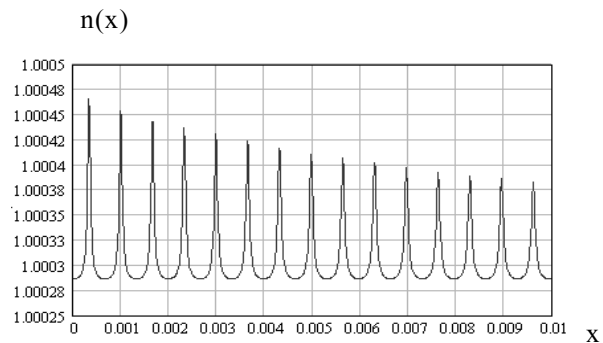


Рис. 2. График изменений коэффициента преломления газовой среды  $n(x)$

В выражении (10) верхний предел интегрирования равен  $\infty$ . На практике верхний предел интегрирования следует выбирать с учетом достижимой точности измерения разности фаз между опорной и сигнальной волнами оптических излучений и расстоянием, проходимым волной механических колебаний в газовой среде с учетом затухания.

В рассматриваемом примере геометрическая длина пути  $l_0 = 0,3$  м, тогда

$$\int_0^{0,3} n(x) dx = 0,300091.$$

Оптическая длина пути  $L_0$  без учета изменений плотности при коэффициенте преломления  $n_0 = 1.00029$ , геометрической длине пути  $l_0 = 0,3$  м составляет

$$L_0 = n_0 l_0 = 1,00029 \cdot 0,3 = 0,300087 \text{ м.}$$

С учетом (1) разность фаз двух оптических излучений, имеющих одинаковые начальные фазы и длину волны  $\lambda = 589$  нм, для представленного примера составляет

$$\Delta\varphi = 3,19 \text{ рад.}$$

Как видно из примера, локальное изменение плотности газовой среды на границе раздела объект-газовая среда приводит к погрешностям измерения разности фаз двух оптических излучений, имеющих одинаковые начальные фазы.

Если не происходит локального изменения плотности газовой среды ( $n = \text{const}$ ), то, исходя из (1), разница геометрических путей двух оптических излучений равна

$$l_1 - l_2 = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi n}. \quad (11)$$

Отсюда для рассматриваемого примера, исходя из (11), при  $n = 1.00029$ ,  $\Delta\varphi = 3,19$  рад,  $\lambda = 589 \cdot 10^{-9}$  м

$$l_1 - l_2 = \frac{3,19 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,00029} = 0,229 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Таким образом, при  $\xi_0 = 10^{-6}$  м погрешность измерения составляет  $0,229 \cdot 10^{-6}$  м или 22,9% от амплитуды смещения механических колебаний.

Из выражения (8) следует, что  $n(x)$  зависит от смещения  $\xi$  и  $\lambda_m$ , вследствие чего определенный интерес представляет зависимость  $n$  от соотношения скорости изменения смещения  $V$  и скорости распространения механических колебаний в газовой среде  $V_c$ .

Скорость изменения смещения  $V(x, t)$  механических колебаний с учетом выражения (5) может быть определена из формулы

$$V(x, t) = \frac{d\xi(x, t)}{dt} = 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right). \quad (12)$$

Связь между скоростью распространения механических колебаний в среде, скоростью изменения смещения механических колебаний и изменением плотности газовой среды для адиабатического процесса выполняется в соответствии с формулой [7]

$$\rho_0 V_c = (\rho_0 + \Delta\rho)(V_c - V). \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) выражение для  $\Delta\rho(x, t)$  имеет вид

$$\Delta\rho(x, t) = \frac{\rho_0 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}{V_c - 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (3), выражение для  $n(x, t)$  примет вид

$$n(x, t) = \sqrt{\frac{V_c - (1 - 2R\rho_0) 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}{V_c - (1 + R\rho_0) 2\pi f \xi_0 e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda_m} x\right)}}. \quad (15)$$

На рис. 3, 4 представлены графики зависимости  $n(x)$ , полученные по формуле (15) при различных значениях  $\frac{V_c}{V}$  когда  $V_c = 331$  м/с.

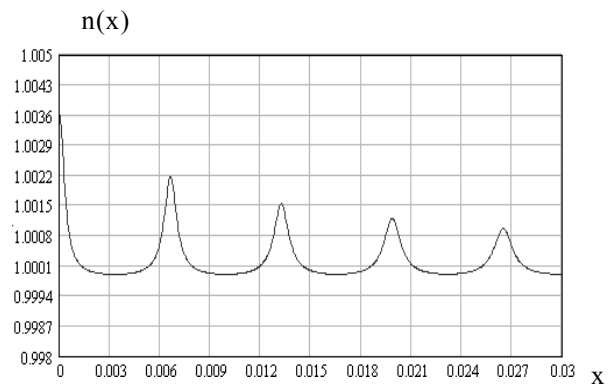


Рис. 3. График зависимости  $n(x)$  при  $\frac{V_c}{V} = 10$

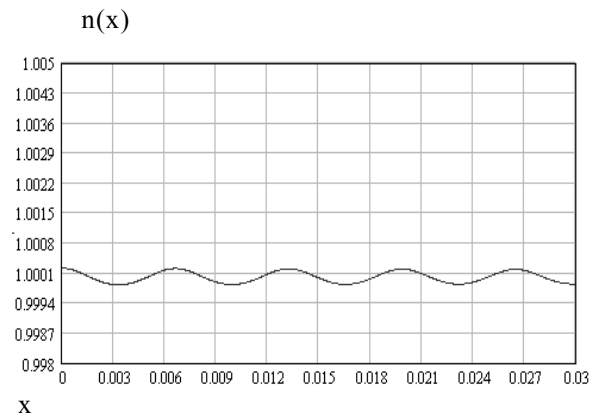


Рис. 4. График зависимости  $n(x)$  при  $\frac{V_c}{V} = 100$

Как видно из представленных графиков, уменьшение отношения  $\frac{V_c}{V}$  приводит к росту коэффициента преломления оптического излучения в газовой среде.

## Выводы

1. Получено соотношение, определяющее распределение коэффициента преломления оптического излучения в локальной области на границе разде-

ла колеблющийся объект-газовая среда в зависимости от частоты механических колебаний объекта, длины волны оптического излучения и плотности невозмущенной газовой среды.

2. Получено соотношение, определяющее распределение коэффициента преломления оптического излучения в локальной области на границе раздела объект-газовая среда в зависимости от соотношения скорости распространения механических колебаний и скорости изменения их смещения.

### Список литературы

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. - М.: Наука, 1973. - 343 с.
2. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С.А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин и др. // Труды института общей физики им. Прохорова. - 2006. - Т. 62.

3. Карташов А.И. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах / А.И. Карташов, И.Ш. Эцин // Успехи физических наук. - 1972. - Т. 106, Вып. 4. - С. 42-45.

4. Морозов Г.В. Метод многократных отражений для электромагнитных волн в слоистых диэлектрических структурах / Г.В. Морозов, Р.Г. Маев, Г.В. Дрейк // Квантовая электроника. - 2001. - № 9. - С. 56-62.

5. Поль Р.В. Оптика и атомная физика / пер.с нем.: под ред. Н.А. Толстого. - М.: Наука, 1966. -Т. 3. - 552 с.

6. Горелик Г.С. Колебания и волны / Г.С. Горелик. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. - 572 с.

7. Алешикевич В.А. Дедеко Л.Г. Караваев В.А. Механика твердого тела / В.А. Алешикевич, Л.Г. Дедеко, В.А. Караваев. - М.: Физический факультет МГУ, 1997. - 72 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗА ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНИХ ЗМІН ЩІЛЬНОСТІ ГАЗОВОЇ СЕРЕДИ НА КОЕФІЦІЄНТ ЗАЛОМЛЕННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Г.Ф. Коняхін, С.А. Косіков

*У статті проаналізовано вплив локальних змін щільності газової середовища, що виникає в результаті збудження в них високочастотних механічних коливань, на коефіцієнт заломлення. Отримані формули для оцінки зміни величини коефіцієнта заломлення на межі розділу об'єкт – газове середовище.*

**Ключові слова:** механічні коливання, газова середовища, оптичне випромінювання, коефіцієнт заломлення

### SOME RESULTS OF THE ANALYSIS OF THE IMPACT OF LOCAL CHANGES IN THE DENSITY OF THE GAS ENVIRONMENT ON THE REFRACTIVE INDEX OF OPTICAL RADIATION

G.F. Konyahin, S.A. Kosikov

*In the article influence is analysed of local changes the closeness of gas environments, arising up as a result of excitation in them of high-frequency mechanical vibrations, on the coefficient of refraction. Formulas are got for the estimation of change of size of coefficient of refraction on the border of section an object is a gas environment.*

**Keywords:** mechanical vibrations, gas medium, optical radiation, the refractive index.