

УДК 621.3049.77

Исследование преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта

Бусурин В.И., Наинг Ту Лвин., Бердюгин Н. А., Ахламов П. С.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: vibusurin@mega.ru*

Аннотация

Рассмотрена структура и математическая модель преобразователя ускорения на основе оптического туннелирования, произведено моделирование его характеристик для воспринимающих элементов различной формы.

Ключевые слова: авиационные двигатели, агрессивные среды, повышенная температура, кварц преобразователь, ускорение, воспринимающий элемент, балка, прогиб

Введение

Измерение ускорений в условиях агрессивных, взрывоопасных сред, а также в зонах повышенной температуры, которые являются характерными для объектов авиационной и космической техники, в частности, авиационных двигателей, может осуществляться с помощью кварцевых преобразователей, построенных на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [1]. Обобщенная структурная схема преобразователя на основе ОТЭ представлена на рисунке 1.

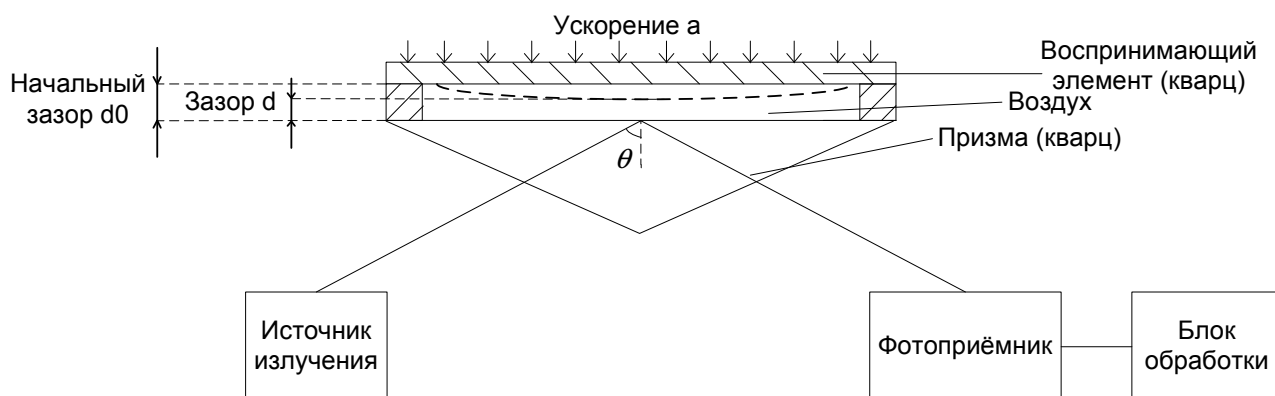


Рис. 1. Обобщенная структурная схема преобразователя на основе ОТЭ

Воспринимающим элементом преобразователя ускорения может быть балка, заземлённая с одного или с двух концов, а также многолучевой элемент.

Функция преобразования преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта представляет собой зависимость выходного напряжения от величины ускорения a , которое определяет величину прогиба воспринимающего элемента и зазор d . Рабочий диапазон прогибов воспринимающего элемента преобразователя на основе оптического туннельного эффекта весьма мал и составляет сотни нанометров. При использовании преобразователя ускорения в реальных условиях эксплуатации, например, в составе систем управления авиационными газотурбинными двигателями, основным дестабилизирующим фактором является температура. Возникающую при этом дополнительную температурную погрешность преобразователя следует также оценить и выработать рекомендации по ее уменьшению.

Расчёт кварцевых воспринимающих элементов преобразователя ускорения на основе ОТЭ

Проведём расчет величины прогиба в зависимости от величины действующего на воспринимающий элемент ускорения для различных типов элементов.

В качестве воспринимающего элемента в преобразователе ускорений может использоваться деформируемая кварцевая балка малых размеров, закрепленная с одного конца (рис. 2).

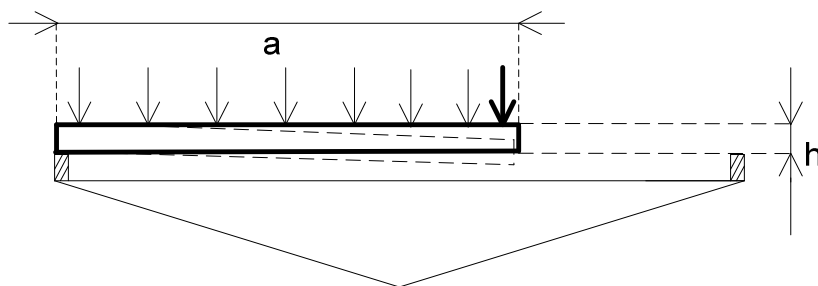


Рис.2. Деформируемая кварцевая балка как воспринимающий элемент преобразователя ускорения

Прогиб балки под действием ускорения, которое приводит к возникновению дополнительной распределенной силы, зависит от конструктивных параметров – длины балки L и толщины h , а также от дестабилизирующих температурных воздействий. Расчёт прогиба балки проводится с помощью универсального уравнения упругой линии, по выражению [2]:

$$w = \frac{1}{E(T) * J_x} * \frac{m * a * L^3}{8},$$

где $E(T)$ - модуль упругости Юнга кварца, $J_x = \frac{b * h^3}{12}$ - момент инерции кварцевой балки.

Прогиб балки не зависит от её ширины b . На рисунке 3,а представлены графики зависимости прогиба от действующего ускорения для балок разной длины ($L_1 = 7 * 10^{-3}$ м, $L_2 = 5 * 10^{-3}$ м, $L_3 = 3 * 10^{-3}$ м) при фиксированной толщине $h = 2 * 10^{-4}$ м. На рисунке 3,б представлена зависимость прогиба от действующего ускорения для балок разной толщины ($h_1 = 10^{-4}$ м, $h_2 = 2 * 10^{-4}$ м, $h_3 = 5 * 10^{-4}$ м) при фиксированной длине $L = 5 * 10^{-3}$ м. С

увеличением длины, при постоянной толщине, увеличивается прогиб. При увеличении толщины балки величина прогиба уменьшается.

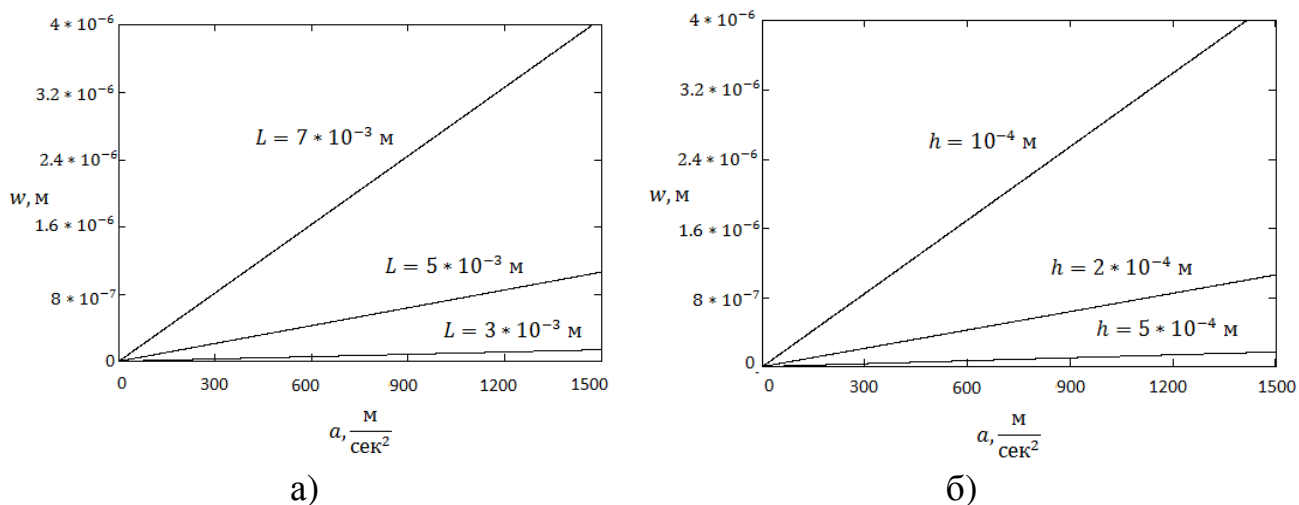


Рис.3.Графики зависимости величины прогиба от действующего ускорения: а) при варьировании длины балки; б) при варьировании толщины балки

Также в качестве чувствительного элемента преобразователя ускорений может использоваться кварцевая балка малых размеров, закрепленная с двух концов (рис. 4).

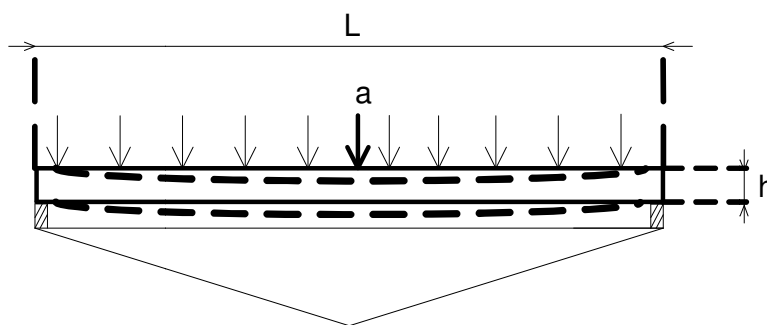


Рис.4.Деформация балки, закрепленной с обоих концов, и используемой в качестве воспринимающего элемента преобразователя ускорения

Прогиб балки под действием ускорения, как и в предыдущем случае, зависит от конструктивных параметров – длины L и толщины h балки, а также от температурных воздействий. Наибольший прогиб наблюдается в середине балки, расчётную формулу получаем из универсального уравнения упругой линии [3]:

$$w = \frac{1}{E(T) * J_x} * \frac{5 * m * a * L^2}{384},$$

где $E(T)$ - модуль упругости Юнга, $J_x = \frac{b * h^3}{12}$ - момент инерции.

Величина прогиба балки, аналогично первому случаю, не зависит от её ширины b . На рисунке 5,а представлены графики зависимости прогиба от действующего ускорения для балок разной длины ($L_1 = 1.75 * 10^{-3}$ м, $L_2 = 10^{-3}$ м, $L_3 = 8 * 10^{-4}$ м) при фиксированной толщине $h = 2 * 10^{-4}$ м; на рисунке 5,б представлена зависимость прогиба от действующего ускорения для балок разной толщины ($h_1 = 10^{-4}$ м, $h_2 = 2 * 10^{-4}$ м, $h_3 = 5 * 10^{-4}$ м) при фиксированной длине $L = 10^{-3}$ м. Аналогично первому случаю, увеличение длины приводит к увеличению величины прогиба, а при увеличении толщины балки величина прогиба существенно уменьшается.

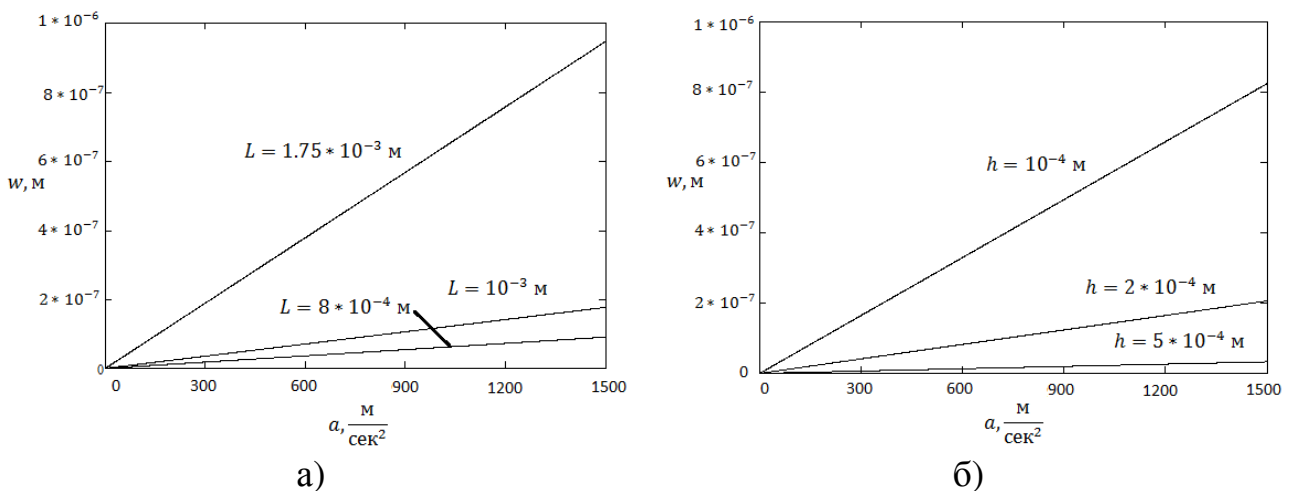


Рис.5. Графики зависимости величины прогиба от действующего ускорения: а) при варьировании длины балки; б) при варьировании толщины балки

В преобразователе ускорений на основе ОТЭ в качестве воспринимающего элемента для уменьшения влияния ускорений, действующих по другим осям, целесообразно использовать одну или несколько скрещенных балок, закреплённых с двух концов. Однако прогиб центра кварцевой балки при воздействующем ускорении $a = 150 g$, при толщине $h_m = 0.2 * 10^{-3}$ м и длине $L_b = 3.5 * 10^{-3}$ м очень мал и равен $w = 5.31 * 10^{-9}$ м. Поэтому для повышения

чувствительности преобразователя к ускорениям можно изменять конструктивные размеры воспринимающего элемента, но более эффективным является использование дополнительной точечной массы, расположенной на балке. Согласно результатам расчетов, прогиб такого воспринимающего элемента, нагруженного в центре балки точечным грузом, равным $10m$, где m – собственная масса балки, составляет $w = 2.18 * 10^{-7} м$. Данное значение является удовлетворительным для чувствительного элемента, и его можно использовать в преобразователе ускорений на основе ОТЭ.

2. Определение функции преобразования преобразователя ускорения на основе ОТЭ

Функция преобразования преобразователя ускорения в зависимости от величины зазора $d(a)$, зависящего от ускорения a , имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = [I_T + S_{\text{ФП}} * P_{\text{ФП}}(R[d(a)])] * R_{I-U},$$

где $S_{\text{ФП}}$ – чувствительность фотодиода; I_T – темновой ток фотодиода; $P_{\text{ФП}}$ – суммарная мощность отраженного излучения, регистрируемая фотодиодом; $R[d(a)]$ – отражательная способность, зависящая от ускорения a , R_{I-U} – сопротивление преобразователя «ток–напряжение», $d(a)$ – зависимость зазора от воздействующего ускорения a .

В общем случае величина зазора d зависит от начального зазора d_0 , предусмотренного конструкцией, а также прогиба мембраны, который, в свою очередь, зависит от величины измеряемого ускорения и действующей температуры T :

$$d = d_0 - w(a, T).$$

От величины зазора зависит отражательная способность и суммарная мощность отраженного излучения. Влияние ускорения и температуры на преобразователь ускорения, воспринимающий элемент которого выполнен в

виде балки из кварца, может быть оценено с помощью отражательной способности, определяемой по выражению [1]:

$$R = 0.5 \left[\frac{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d(a)\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d(a)\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\perp} - \phi_{23\perp})}{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d(a)\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d(a)\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\perp} + \phi_{23\perp})} + \frac{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\parallel} - \phi_{23\parallel})}{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\parallel} + \phi_{23\parallel})} \right],$$

где $\phi_{12\perp}, \phi_{23\perp}$ и $\phi_{12\parallel}, \phi_{23\parallel}$ - коэффициенты, λ - длина электромагнитной волны, n_1, n_2 - показатели преломления призмы из кварца и воздуха соответственно.

На рисунке 6 представлен график зависимости отражательной способности при толщине $h_m = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и длине $L_b = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ воспринимающего элемента от ускорения.

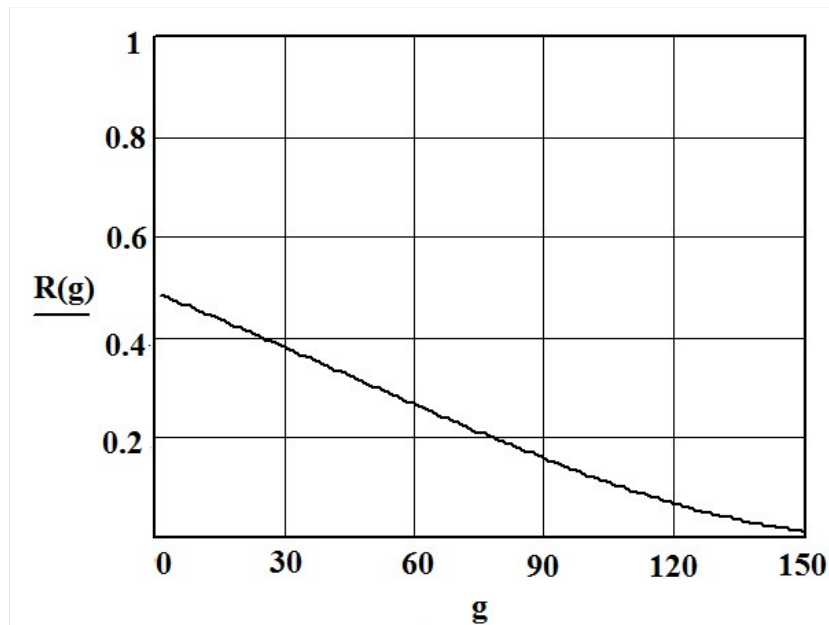


Рис. 6. Зависимость отражательной способности при выбранных параметрах и при $\theta = 0.9 \text{ рад}$ и $\lambda = 10^{-6} \text{ м}$ при $d_0 \approx 0.16 \text{ мкм}$

При вариациях температуры в преобразователе ускорения возникает изменение зазора d между призмой и мембраной из-за температурного

расширения материала прокладки. Прогиб балки зависит также от воздействия температуры на модуль упругости материала $E(T)$.

С учетом коэффициента температурного расширения TKE для кварца при изменении температуры величина начального зазора d_0 изменяется (рис. 7).

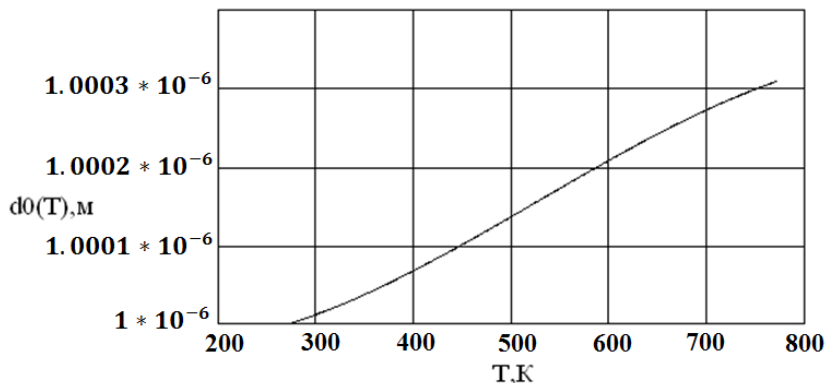


Рис.7. Зависимость начального зазора d_0 от температуры

Поэтому зазор d не только зависит от прогиба мембраны и под воздействием ускорения, но также зависит от температурного изменения деформации балки.

На рисунке 8 представлен график зависимости абсолютной погрешности отражательной способности от температуры окружающей среды при воздействующем ускорении $a = 150g$.

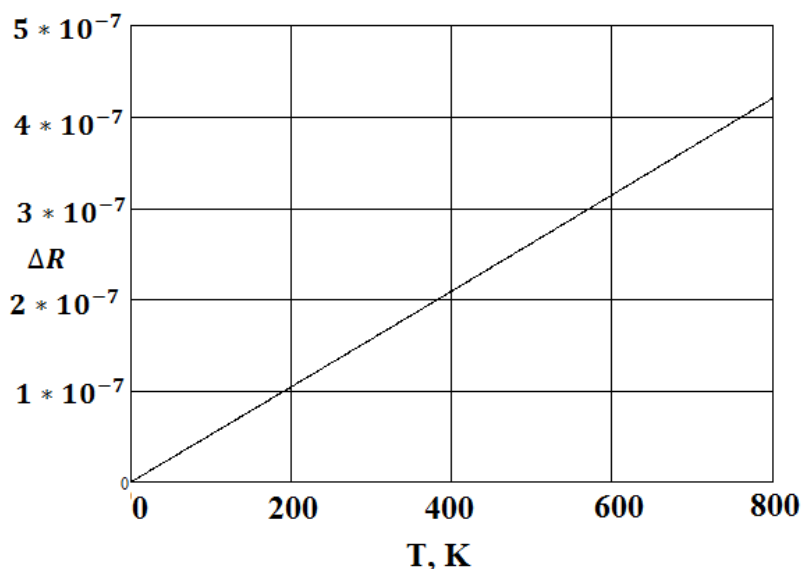


Рис. 8 –Зависимость абсолютной погрешности отражательной способности при выбранных параметрах и воздействии температуры

Из этого следует, что мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ несколько увеличивается при увеличении температуры.

Для уменьшения дополнительной погрешности, вызываемой температурой, необходимо поводить измерение температуры и по его результатам вводить коррекцию.

Такой преобразователь можно применять в системах управления двигателями, когда необходимо использовать данные об ускорении в различных зонах с высоким перепадом температур.

Выводы

Как показали расчёты, отражательная способность преобразователя ускорения на основе ОТЭ, а, следовательно, и его функция преобразования зависит от начального зазора и конструктивных параметров воспринимающего элемента. Для повышения чувствительности преобразователя ускорения необходимо использовать дополнительную точечную массу, расположенную в центре воспринимающего элемента.

Библиографический список

1. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Жеглов М.А., Звей Нэй Зо - Моделирование преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта с настраиваемым диапазоном измерения, Вестник Московского Авиационного института, 2012 т. 19, №4, с. 128-133.
2. Долинский Ф.В. Михайлов М.Н., Краткий курс сопротивления материалов. М.: Высшая школа, 1988. 433 с.
3. Андреева Л.Е., Пономарев С.Д., Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.