

УДК 681.586.5

## **Анализ погрешностей преобразователя ускорения, построенного на основе оптического туннельного эффекта**

**Бусурин В.И.\*, Коробков В.В., Наинг Ту Лвин**

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

*\*e-mail: [vbusurin@mai.ru](mailto:vbusurin@mai.ru)*

Рассмотрено влияние конструктивных параметров воспринимающего четырехлучевого элемента, построенного на основе оптического туннельного эффекта, на характеристики преобразователя ускорения; проведен анализ погрешностей такого преобразователя ускорения, показывающий возможность построения малогабаритного помехозащищенного измерительного устройства для пассажирского самолета.

**Ключевые слова:** преобразователь, ускорения, четырехлучевой элемент, туннелирование, призма, температура, отражательная способность, погрешность.

### **Введение**

В настоящее время измерение ускорения на борту летательных аппаратов занимает значительную часть всех измерений. В работе исследован преобразователь ускорения, обеспечивающий измерение ускорения в диапазоне, достаточном для использования на пассажирском самолете. Для измерения ускорения можно построить преобразователь на основе оптического

туннельного эффекта (ОТЭ) в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина», выполненной из плавленого кварца[1]. Такой преобразователь ускорения может использоваться в реальных условиях эксплуатации, например, в составе систем управления самолетами в инерциальных навигационных системах. Его целесообразно использовать в тех случаях, когда определяющими являются малые размеры, масса и возможность работы в агрессивных, взрывоопасных средах и различных зонах температуры, что характерно для авиационной техники.

Воспринимающим элементом преобразователя ускорения могут являться консоль, балка или многолучевые элементы. Результаты исследования разных конструкций воспринимающего элемента показывают, что при построении преобразователя ускорения следует учитывать ограничения на размеры и минимальное влияние поперечных ускорений. При этом под действием ускорения  $10g$ , при равных поперечных размерах и длинах лучей, заземленная балка получит максимальный прогиб  $w=1.45\text{мкм}$ , трехлучевой элемент - около  $1\text{мкм}$ , четырехлучевой элемент -  $0,71\text{мкм}$ . На рисунке 1 представлены зависимости прогибов разных воспринимающих элементов от ускорения.

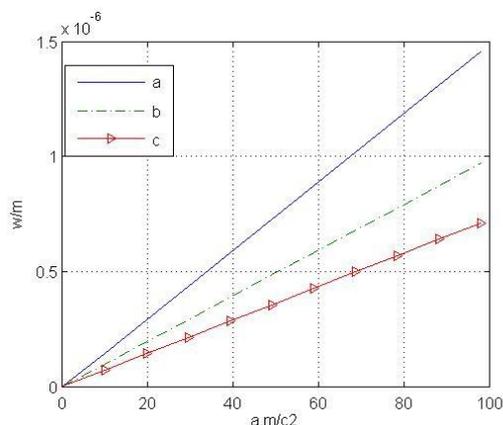


Рис1. Зависимости прогибов разных воспринимающих элементов от ускорений: *a*- зашпеленная балка, *b*- трехлучевой элемент, *c*- четырехлучевой элемент

Величины отклонений трехлучевого элемента и четырехлучевого элемента подходят для построения преобразователя на основе ОТЭ. Они также мало подвержены влиянию поперечного ускорения. Выберем в качестве основного вида воспринимающего элемента для преобразователя ускорения на основе ОТЭ четырехлучевой элемент.

Функция преобразования преобразователя ускорения, построенного на основе оптического туннельного эффекта, представляет собой зависимость выходного напряжения, определяемого величиной выходной оптической мощности, от величины ускорения *a*, которое, в свою очередь, определяет величину прогиба воспринимающего элемента и зазора *d*.

Прогиб четырехлучевого элемента под действием ускорения зависит от длины лучей *l* и толщины *h*. Кроме того, прогиб под действием ускорения зависит от дополнительной массы, которую можно расположить в центре четырехлучевого элемента.

Преобразователь состоит из источника излучения (ИИ), призмы полного внутреннего отражения, воспринимающего элемента из оптического материала с дополнительной массой в центре, лучи которого зашпелены по краям на поверхности призмы, фотоприемника (ФП) и блока обработки (БО) (рисунок 2).

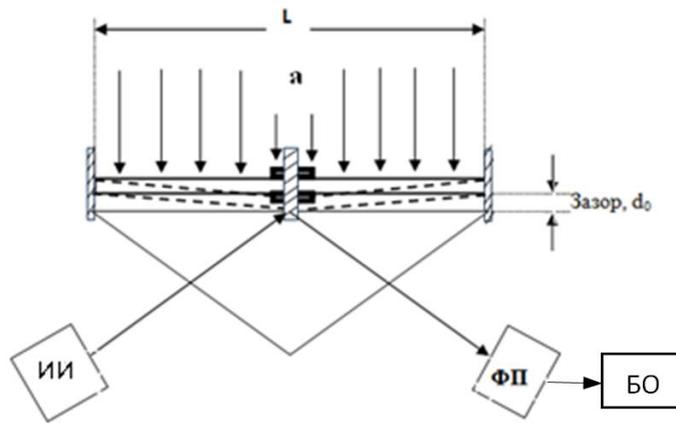


Рис 2. Функциональная схема преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта

Поскольку призму полного внутреннего отражения и воспринимающий элемент дополнительной массой можно выполнить полностью из кварцевого стекла, то такой преобразователь способен работать при повышенных температурах.

Прогиб четырехлучевого элемента с дополнительной массой может быть определено по формуле [2]:

$$w(a) = \frac{12 \cdot \rho \cdot a \cdot l^4}{1136 \cdot E \cdot h^2} + \frac{12 \cdot m \cdot a \cdot l^3}{768 \cdot E \cdot b \cdot h^3},$$

где  $w(a)$ —прогиб центральной части четырехлучевого элемента;  $\rho$  - плотность элемента;  $l$ - длина лучей;  $m$ — дополнительная масса;  $E$  – модуль упругости воспринимающего элемента;  $h$  – толщина лучей;  $b$ - ширина лучей.

## 1. Определение функции преобразования преобразователя ускорения на основе ОТЭ

В общем случае величина зазора  $d$  зависит от начального зазора  $d_0$ , предусмотренного конструкцией, а также прогиба элемента  $w(a)$ , который, в свою очередь, зависит от величины измеряемого ускорения  $a$ :

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

Для случая полного внутреннего отражения зависимость отражательной способности границы раздела  $R=f(a)$  от воздействующего ускорения, построенная при следующих параметрах: начальный зазор  $d_0=0.87$  мкм, длина лучей  $l=5$  мм, толщина лучей  $h=200$  мкм, показатель преломления призмы  $n_1=1.46$ ; длина волны света  $\lambda=1.3$  мкм; показатель преломления воспринимающего элемента  $n_3=1.46$ ; разделительная среда – воздух ( $n_2 \approx 1$ ); угол падения  $\theta=50^\circ$ , представлена на рисунке 3. При этом для получения квазилинейной зависимости максимальное значение отражательной способности должно быть выбрано около 0,93, а минимальное – 0,49.

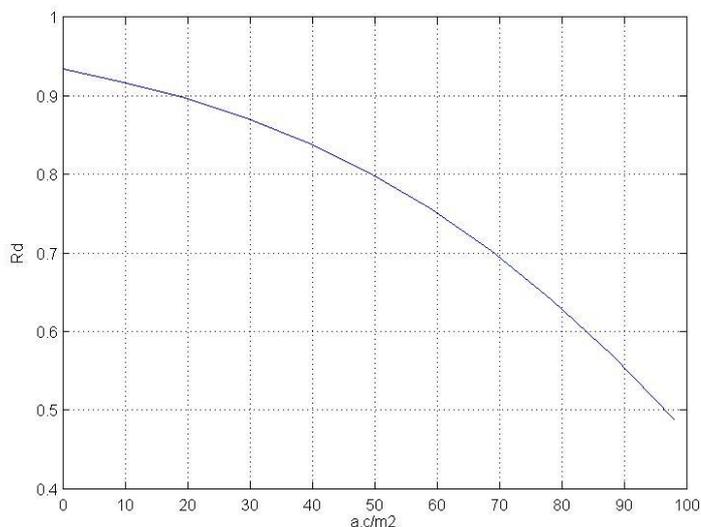
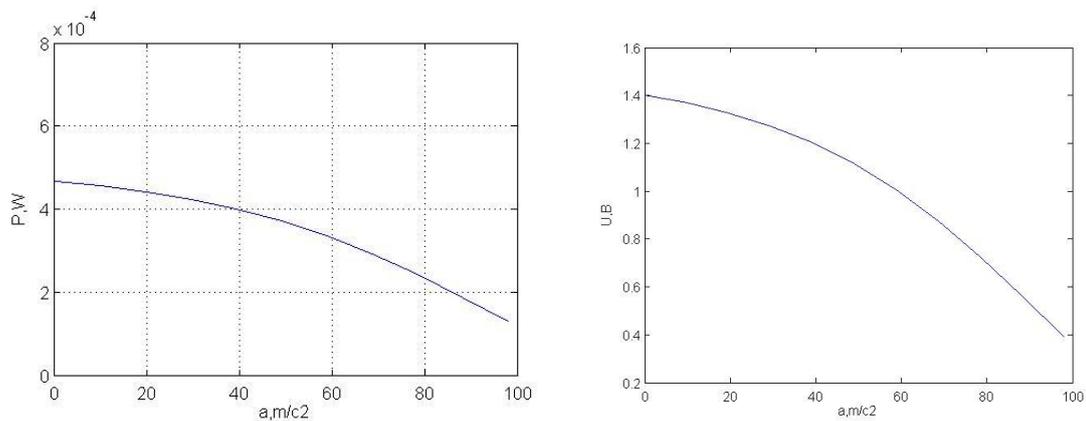


Рис 3. Зависимость отражательной способности границы призма-воспринимающий элемент от ускорения

По изменениям отражательной способности можно определить зависимость выходной оптической мощности  $P_{\text{ФПот}}$  от ускорения:  $P_{\text{ФП}} = P_{\text{ИИ}} \cdot R(a) \cdot k_{\text{потерь}}$ , где  $R(a)$  - отражательная способность, зависящая от ускорения,  $k_{\text{потерь}}$  - коэффициент оптических потерь, и функцию преобразования, то есть зависимость выходного напряжения БО  $U_{\text{вых}}$  от ускорения  $a$ :  $U_{\text{вых}} \approx R_{\text{ОС}} \cdot S_{\text{ФП}} \cdot P_{\text{ФП}} \cdot R(a)$ , где  $R_{\text{ОС}}$  - сопротивление обратной связи;  $S_{\text{ФП}}$  - чувствительность фотоприемника. На рисунке 4 показаны изменения выходной оптической мощности и выходного напряжения от ускорения.



а) б)

Рис 4. Изменение выходной оптической мощности от ускорения при  $P_{\text{ИИ}}=1\text{ мВт}$  (а)

и выходного напряжения от ускорения при  $R_{\text{ОС}}=10\text{ кОм}$ ,  $S_{\text{ФП}}=0,3\text{ А/Вт}$  (б)

## 2. Анализ погрешности первичного преобразователя ускорения с учетом переменности зазора и угла падения

Функция преобразования первичного преобразователя ускорения представляет собой зависимость выходной мощности оптического излучения  $P_{\text{ФПот}}$  от ускорения.

Эта зависимость с учетом переменности начального зазора при заданных

выбранных параметрах преобразователя ( $P_{\text{ин}}=1\text{мВт}$ ,  $k_{\text{потерь}}=0.5$ ,  $l=5\text{мм}$ ,  $b=0.5\text{мм}$ ,  $h=500\text{мкм}$ ,  $d_0=0.87\text{мкм}$ ) в диапазоне изменения ускорения  $0\text{...}10g$  приведена на рисунке 5.

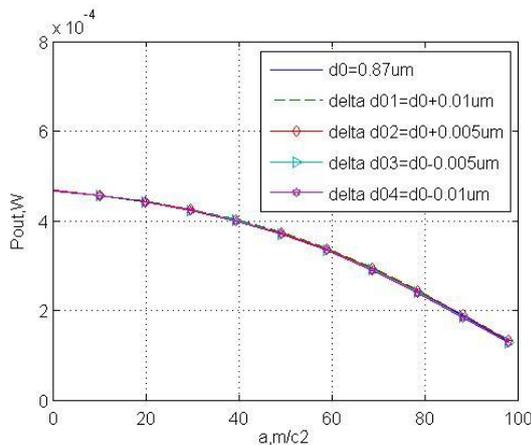


Рис 5. Зависимость выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях начального зазора  $d_0 = \text{var}$

Выходная мощность оптического излучения преобразователя при измерении максимального ускорения уменьшается почти в два раза. При этом из-за возможного отклонения величины начального зазора  $d_0$  будет изменяться величина выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$ , причем при увеличении величины начального зазора оптическая мощность возрастает, а при уменьшении начального зазора - уменьшается.

На рисунке 6 представлены зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при начальном зазоре  $d_0 = \text{var}$ . Их анализ показывает, что отклонения величины начального зазора достаточно сильно влияют на характеристики оптического преобразователя. Если величина начального

зазора  $d_0$  увеличится или уменьшится на  $0,01\mu\text{м}$ , то величина относительной погрешности выходного сигнала составит около 1% при ускорении  $5g$ .

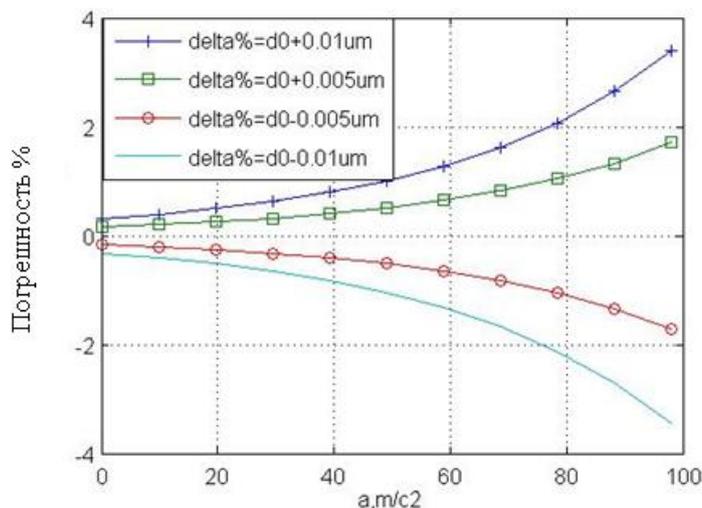
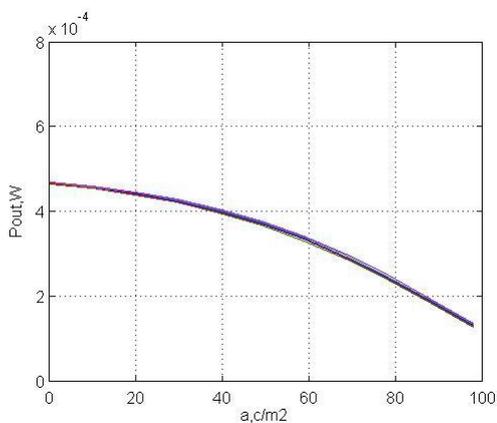
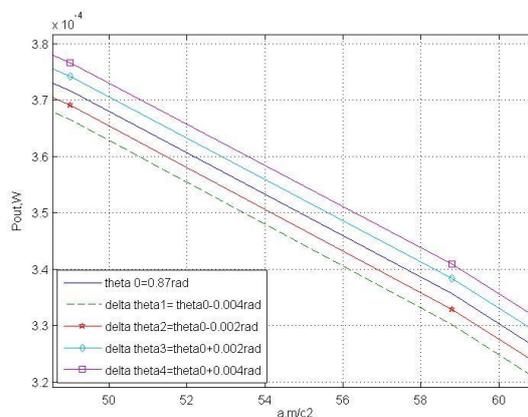


Рис 6. Зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при начальном зазоре  $d_0 = \text{var}$

На рисунке 7 представлены зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при вариациях угла падения  $\theta = \text{var}$  ( $P_{\text{ИИ}}=1\text{мВт}$ ,  $k_{\text{потерь}}=0.5$ ,  $l=5\text{мм}$ ,  $b=0.5\text{мм}$ ,  $h=500\mu\text{м}$ ,  $d_0=0.87\mu\text{м}$ ) в диапазоне изменения ускорения  $0 \dots 10g$ . С увеличением величины угла падения выходная мощность оптического излучения  $P_{\text{ФП}}$  несколько увеличивается.



а)



б)

Рис 7. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при падающем угле  $\theta = \text{var}(a)$  и их увеличенное изображение (б)

На рисунке 8 представлены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при изменениях угла падения излучения. Если увеличить величину угла падения на 0,002рад, то величина погрешности составит 0,7% при ускорении 5g; если изменять величину угла падения в пределах  $\pm 0,004$ рад, то величина погрешности составит 1,3 %, то есть изменение величины угла падения сильно влияет на характеристики оптического преобразователя.

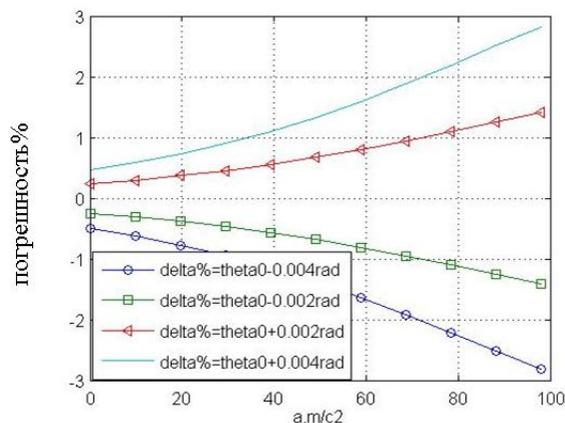
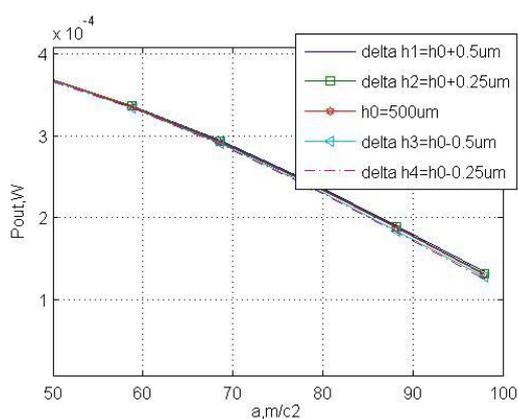


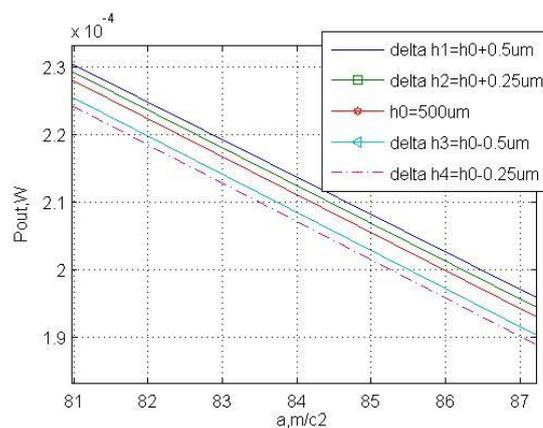
Рис 8. Зависимости погрешности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при угле падения  $\theta = \text{var}$

### 3. Анализ погрешности преобразователя ускорения с учетом размеров воспринимающего четырехлучевого элемента

В качестве воспринимающего четырехлучевого элемента в преобразователе ускорения используется кварцевая деталь малых размеров. Прогиб элемента под действием ускорения зависит от длины лучей  $l$ , их толщины  $h$  и ширины  $b$ . На рисунке 9 представлены зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях толщины воспринимающего четырехлучевого элемента.



а)



б)

Рис 9. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $h = \text{var}$  (а) и их увеличенное изображение (б)

Анализ результатов, представленных на рисунках 9,а и 9,б показывает, что при увеличении толщины лучей четырехлучевого элемента величина выходной оптической мощности также увеличивается. При погрешности толщины элемента в 0,25мкм погрешность выходного сигнала составит около 0,15 % при ускорении 5g. На рисунке 10 представлены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях толщины. Когда погрешность толщины элемента увеличивается до 0,5мкм, то есть толщина лучей четырехлучевого элемента составляет от 499,5мкм до 500,5мкм, погрешность преобразователя при том же ускорении достигает 0,3%.

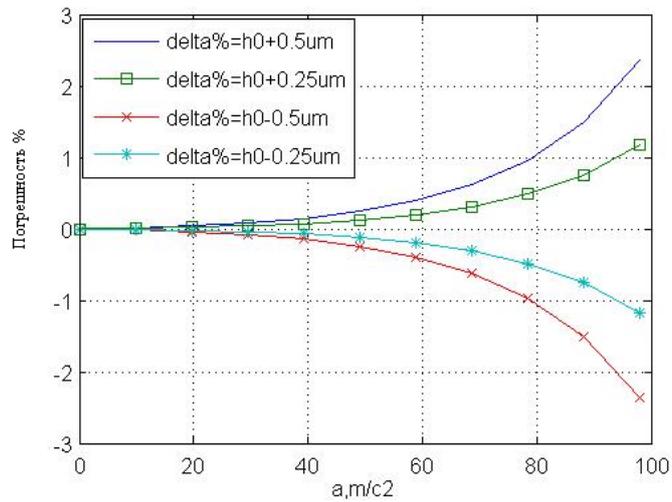
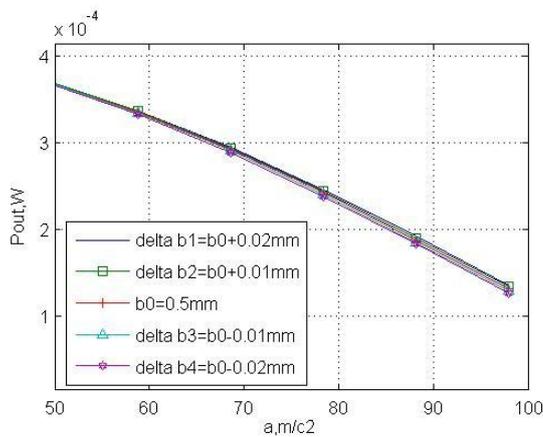
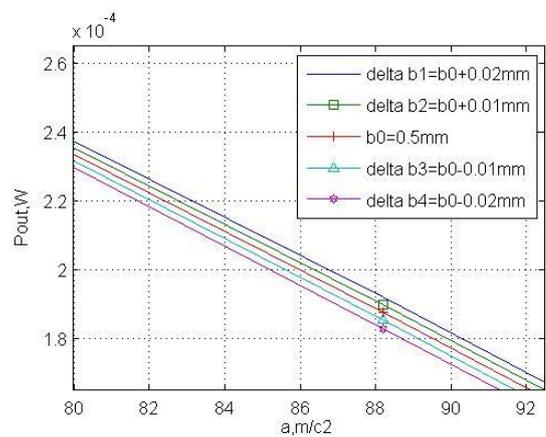


Рис. 10. Зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $h = \text{var}$

Отклонения ширины воспринимающего четырехлучевого элемента дополнительной массой  $m_0$  также приводят к изменению выходной оптической мощности. На рисунке 11 приведены зависимости мощности оптического излучения  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях ширины. Анализ показывает, что при увеличении ширины лучей четырехлучевого элемента величина выходной оптической мощности также увеличивается.



а)



б)

Рис 11. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $b = \text{var}$  (а) и их увеличенное изображение (б)

Если отклонение ширины лучей достигает 0,02мм, то есть ширина лучей четырехлучевого элемента находится в диапазоне от 0,52мм до 0,48мм, погрешность достигнет величины около 0,5 % при ускорении 5g. На рисунке 12 приведены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях ширины.

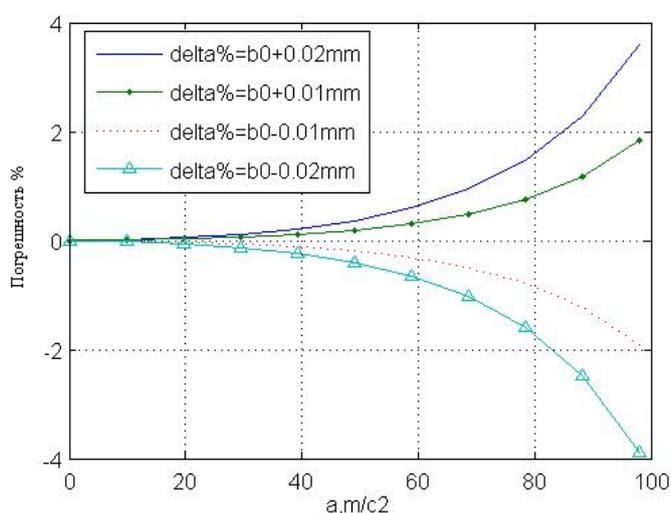
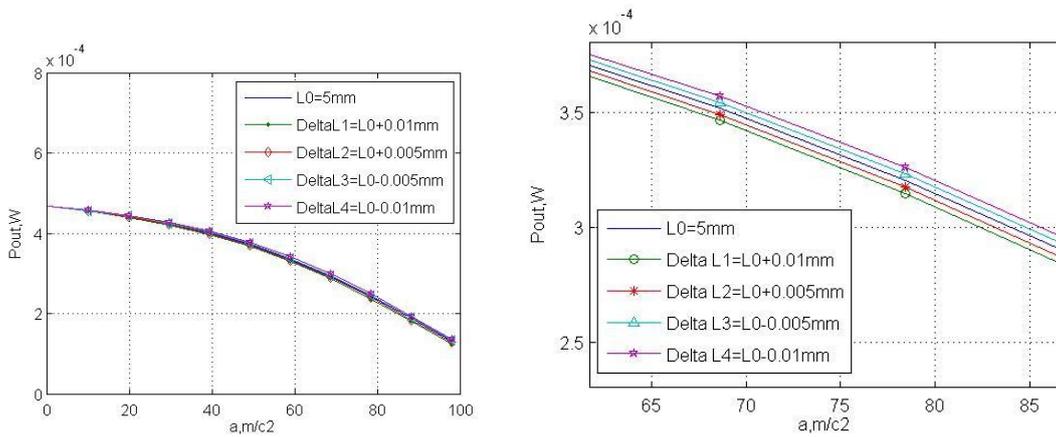


Рис 12. Зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $b = \text{var}$

Изменение выходной мощности происходит также из-за изменения длины воспринимающего четырехлучевого элемента. На рисунке 13 приведены зависимости мощности оптического излучения  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях длины лучей. Когда длина лучей четырехлучевого элемента увеличивается, величина выходной оптической мощности уменьшается.



а)

б)

Рис 13. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $l = \text{var}$  (а) и их увеличенное изображение (б)

При отклонениях длины до 0,01 мм, например, когда длина лучей четырехлучевого элемента находится в диапазоне от 4,99мм до 5,01мм, погрешность составит около 1 % при ускорении 5g. На рисунке 14 приведены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях длины лучей.

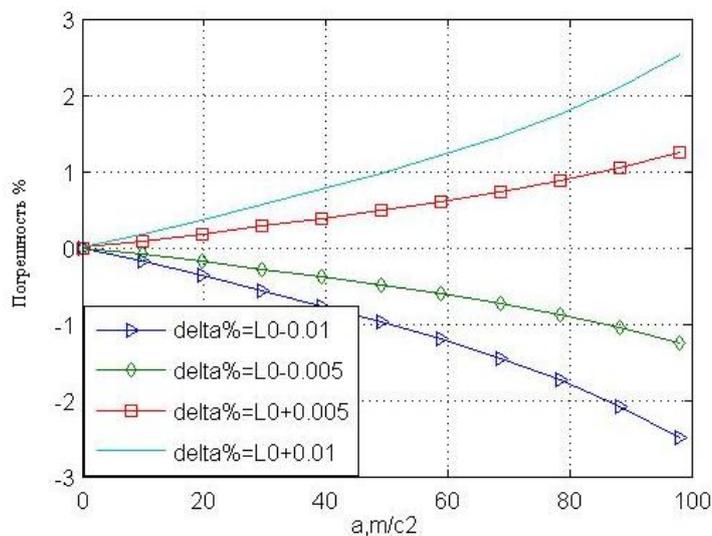
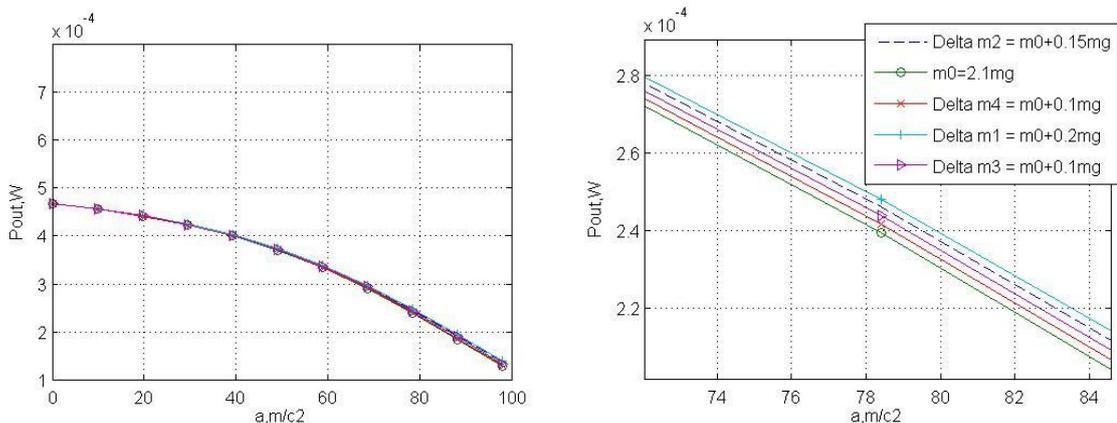


Рис14. Зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $l = \text{var}$

#### 4. Анализ погрешности преобразователя ускорения на основе ОТЭ с учетом изменений дополнительной массы воспринимающего элемента

Для увеличения чувствительности преобразователя ускорения может быть введена дополнительная масса  $m_0$ , расположенная, например, в центре воспринимающего элемента. В этом случае прогиб центральной части элемента под действием ускорения зависит также и от величины дополнительной массы воспринимающего элемента. При этом следует учитывать, что, если установить очень большую дополнительную массу, то диапазон измерения ускорений уменьшится, и линейность преобразования ухудшится. Введение дополнительной массы  $m_0 = 2,1 \text{ мг}$ , где  $m_0$  - величина массы четырехлучевого воспринимающего элемента, расположенной в центре воспринимающего элемента, приводит к получению достаточной чувствительности к ускорению в диапазоне до  $10g$ . На рисунке 15 приведены зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях величины дополнительной массы.



а)

б)

Рис 15. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при  $m = \text{var}(a)$  и их увеличенное изображение (б)

Анализ этих зависимостей показывает, что, если отклонение величины дополнительной массы составит до 0,05 мг ( $m = m_0 \pm 0,05 \text{ мг}$ ), то есть дополнительная масса будет находиться в диапазоне от 2,05 мг до 2,15 мг, то максимальная погрешность будет достигать 0,3% при ускорении 5g. На рисунке 16 приведены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при отклонениях дополнительной массы.

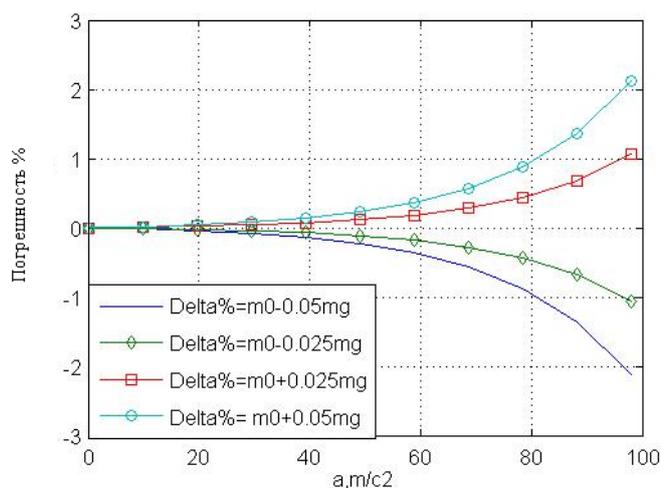


Рис 16. Зависимости погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при дополнительной массе  $m = \text{var}$

## 5. Анализ погрешности преобразователя ускорения с учетом влияния температуры

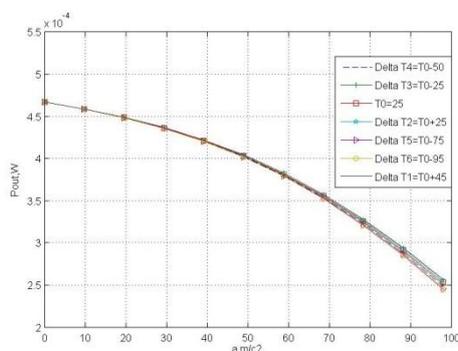
При вариациях температуры в преобразователе ускорения возникает изменение зазора  $d$  между призмой и центральной частью четырехлучевого элемента из-за температурного расширения материала прокладки. Анализ показал, что в связи с его малостью оно оказывает незначительное влияние на выходную оптическую мощность и его влиянием можно пренебречь.

Прогиб четырехлучевого элемента зависит также от воздействия температуры  $T$  на модуль упругости материала  $E(T)$  [3]:

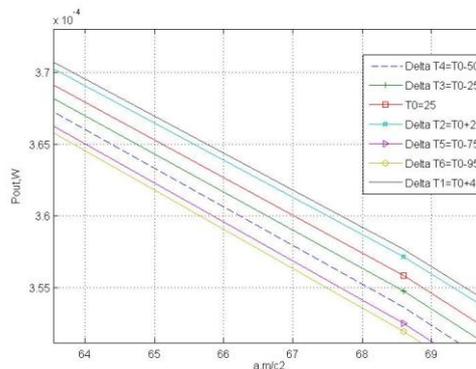
$$E(T) = E_0 + \beta(T - T_0),$$

где  $E_0$  - модуль упругости при комнатной температуре  $T_0=25^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент модуля упругости.

Модуль упругости кварца изменяется не очень сильно, но все же надо учитывать влияние на него температуры. Изменения выходной оптической мощности при температурных изменениях модуля упругости представлены на рисунке 17. Максимальные изменения выходной оптической мощности от 0,341 мВт до 0,346 мВт наблюдаются при максимальном ускорении.



а)



б)

Рис 17. Зависимости выходной оптической мощности от ускорения при разных температурах (а) и их увеличенное изображение (б)

Предположительный температурный диапазон работы оптического преобразователя ускорения в составе систем управления пассажирского самолета составит от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . При вариациях температуры модуль дополнительной температурной погрешности составит на границах диапазона  $0,5\%$  (при  $T=-50^{\circ}\text{C}$ ) и  $0,2\%$  (при  $T=+50^{\circ}\text{C}$ ) под действием ускорения  $5g$ . На рисунке 18 приведены зависимости дополнительной температурной погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при различных температурах.

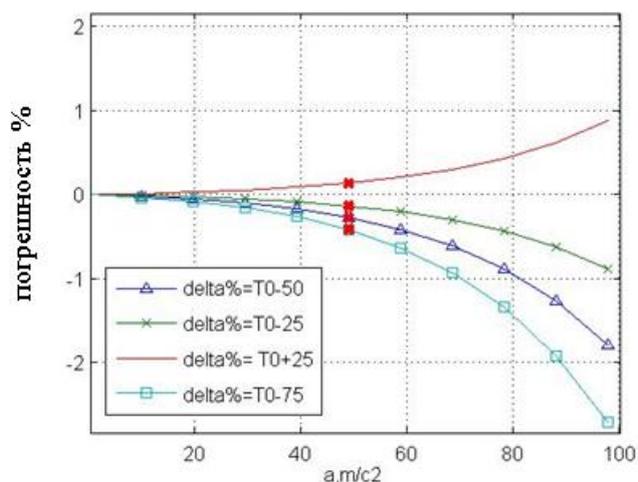


Рис 18. Зависимости дополнительной температурной погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  от ускорения при температуре  $T = \text{var}$

## Выводы

Произведено исследование характеристик преобразователя ускорения, построенного на основе оптического туннельного эффекта. Выбраны конструктивные параметры первичного преобразователя для получения

квазилинейной функции преобразования. Проведен анализ погрешностей преобразователя ускорения, построенного на основе оптического туннельного эффекта, в диапазоне ускорений, достаточном для применения на пассажирском самолете. Исследовано влияние отклонений воздушного зазора и угла падения излучения. Допустимый диапазон их отклонений от заданных значений при погрешности преобразования около 1% при ускорении  $5g$  составляет  $10\text{ нм}$  для начального зазора и  $0,17$  градуса – для угла падения излучения. Проведен анализ погрешности преобразователя ускорения с учетом отклонений конструктивных параметров воспринимающего четырехлучевого элемента с дополнительной массой. При этом для погрешности 0,3% отклонения значений должны быть не более, чем  $0,5\text{ мкм}$  – для толщины,  $20\text{ мкм}$  – для ширины,  $3\text{ мкм}$  – для длины лучей элемента и  $0,05\text{ мг}$  – для дополнительной массы. Исследовано влияние температуры на дополнительную погрешность преобразователя ускорения; показано, что в диапазоне температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  она составит менее 0,5% при ускорении  $5g$ .

*Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-00493-а).*

### **Библиографический список**

1. В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов // Волоконно- оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения – М.: Энергоатомиздат, 1990 - 256 с.
2. Ryder G. H., Strength of materials – THIRD EDITION IN SI UNITS, 1969, 197 с.
3. DeHoff R. T., "Thermodynamics in material science", McGraw-Hill, 1993, с 18.