

09;10

Волоконно-оптические кабели с высокой акустической изоляцией

© А.А. Власов¹, А.С. Алейник¹, А.Н. Аширов¹, М.Ю. Плотников¹, А.В. Варламов²¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: salusnetklim@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2019 г.

Принято к публикации 29 апреля 2019 г.

Проведены теоретические расчеты и экспериментальное исследование степени снижения акустической чувствительности оптического волокна в диапазоне частот 20–20 000 Hz внутри кабелей специальной конструкции. Достигнута высокая степень снижения акустической чувствительности: более чем на 29 dB по отношению к стандартному одномодовому волокну SMF-28 в полимерной оболочке. Данный результат может существенно повысить пороговую чувствительность измерительных систем на основе волоконно-оптических интерферометров.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, шум окружающей среды, шумоподавление, шумоизоляция.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48083.17839

Доля измерительных систем на основе волоконно-оптических интерферометрических фазовых датчиков (ВОИФД) на рынке систем мониторинга неуклонно растет [1] в связи с рядом преимуществ по сравнению с традиционными электрическими датчиками. Спрос на эти системы стремительно увеличивается в таких отраслях, как нефтегазовая и горнодобывающая промышленность, военно-промышленный комплекс, а также многих других [1]. Для построения указанных систем часто используются специальные волоконно-оптические кабели [2–4], конструкция которых разрабатывается таким образом, чтобы повысить чувствительность оптического волокна (ОВ) к внешним воздействиям, в частности к акустическим колебаниям. Использование таких специальных кабелей в качестве чувствительных элементов позволяет повысить чувствительность измерительных систем.

В то же время помимо чувствительного элемента в высокоточные системы на основе ВОИФД входит так называемый компенсационный интерферометр [2,5], для которого, напротив, необходима максимальная изоляция от внешних акустических воздействий, приводящих к повышению уровня шумов и ухудшению параметров измерительной системы в части пороговой чувствительности, точности и динамического диапазона. Одним из известных способов снижения акустической чувствительности ОВ является нанесение защитных покрытий. Вопросам применения различных покрытий оптического волокна для защиты от акустических шумов окружающей среды посвящено большое количество исследований [6–12]. В этих работах изучаются полимерные [6,9], гальванические [7] и композитные [8] покрытия. Их применение требует высокой точности толщин слоев покрытий (в микрометровом диапазоне) и является довольно сложной технологической задачей.

Несоблюдение этих требований ведет к снижению эффективности акустической изоляции [7]. В [11,12] упоминаются металлизированные покрытия для снижения акустической чувствительности. Во многих упомянутых работах рассматривается статическая модель акустической чувствительности оптического волокна, основанная на расчете разности фаз, вызванной воздействием на ОВ постоянного давления. Корректность данной модели для расчетов в низкочастотной области до 2–3 kHz была подтверждена многими работами [6–13], по этой причине она широко используется для оценки эффективности шумоподавления или определения усиления акустической чувствительности ОВ с различными покрытиями. Защита чувствительных плеч компенсационного интерферометра именно в упомянутом диапазоне частот является наиболее критичной в такой области применения волоконно-оптических датчиков, как гидроакустика [14].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы разработать наиболее эффективные покрытия волоконно-оптического кабеля, совместимые со стандартными технологиями кабельной промышленности, и провести экспериментальное исследование акустических изоляционных свойств во всем звуковом диапазоне частот 20–20 000 Hz.

Для проведения исследований были подготовлены четыре образца волоконных кабелей с разнотипными покрытиями. Данные образцы могут быть разделены на две группы (рис. 1 и таблица). К первой группе относятся образцы № 1, 2, защитные свойства которых основаны на применении медной трубки в качестве жесткой составляющей с различными заполнениями зазора между внутренними стенками трубки и оптическим волокном. В качестве заполнения использовались материалы с раз-

Перечень экспериментальных образцов с описанием защитных покрытий

Номер образца	Описание образца	Эффективный модуль Юнга покрытия, ГПа	Эффективный коэффициент Пуассона покрытия, rel. un.
1	ОВ в медной трубке с заполнением зазора полимерным компаундом ЭВ-2БП-Г ($E = 3$ МПа, $\mu = 0.49$)	76.2	0.39
2	ОВ в медной трубке с заполнением зазора полимерным компаундом RTV-655 ($E = 5.6$ МПа, $\mu = 0.4$)	76.2	0.37
3	Оптический кабель с бронированием стальным тросом (шесть жил, $D = 0.7$ мм, $E = 200$ ГПа, $\mu = 0.3$) и заполнением гидрофобным гелем ($D = 1.3$ мм, $E = 1.2$ ГПа, $\mu = 0.2$)	82.2	0.38
4	Стандартное оптическое волокно в акрилатной оболочке	18.6	0.23

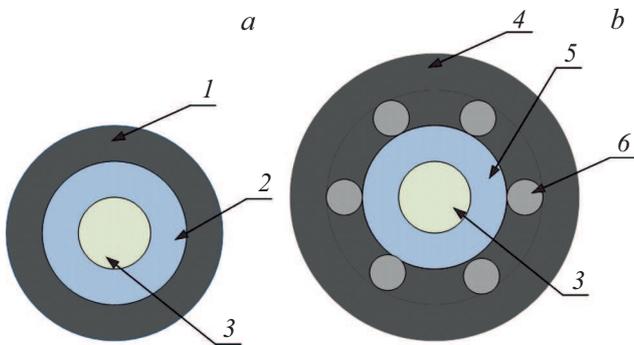


Рис. 1. Сечение образцов волоконно-оптических кабелей с различным исполнением акустической изоляции: *a* — образцы № 1, 2; *b* — образец № 3. 1 — медная трубка (внешний диаметр $D = 2.4$ мм), 2 — заполнение зазора ($D = 1.2$ мм), 3 — одномодовое оптическое волокно в акрилатной защитной оболочке ($D = 250$ мкм), 4 — полимерная оболочка ($D = 4$ мм), 5 — заполнение гидрофобным гелем ($D = 1.3$ мм), 6 — шесть жил стального троса ($D = 0.7$ мм).

личными характеристиками упругости. Ко второй группе относится образец № 3 с тросовым бронированием световедущей жилы, представляющий собой сложную систему, высокая жесткость которой обусловлена материалом тросовых жил (сталь), а совокупные эластичные свойства распределены между полимерной оболочкой, гидрофобным наполнителем и витым металлическим тросом. Образец № 4 является контрольным и представляет собой стандартное телекоммуникационное оптическое волокно SMF-28 в акрилатной оболочке. Длины образцов согласованы между собой.

Исследование проводилось на акустическом стенде, схема которого изображена на рис. 2. Оптическая часть схемы представляла собой волоконный интерферометр, сигнал с которого обрабатывался с помощью метода гомодинной демодуляции, реализованного на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) [2,5].

Широкополосный динамик в акустическом оформлении типа „открытый экран“ использовался для воздействия на исследуемые образцы стационарным шумовым сигналом (белый шум). Исследуемые образцы находились в сетчатой подвесной платформе для подавления вибрационных воздействий. На рис. 3, *a* представлены экспериментальные зависимости спектральной плотности мощности демодулированного сигнала интерферометра в полосе частот до 20 000 Hz. Резонансные пики на полученных экспериментальных зависимостях связаны с

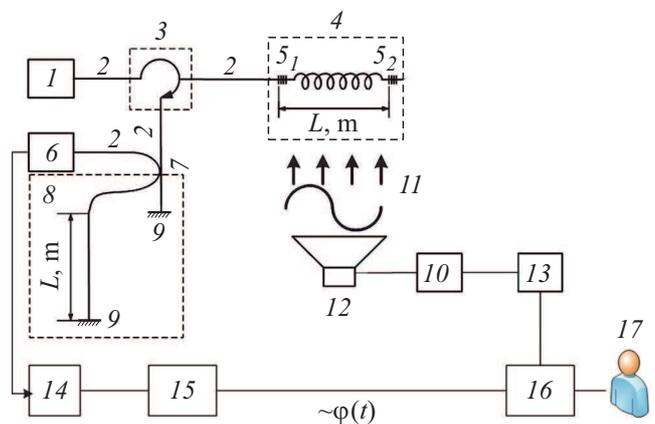


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения измерений акустической чувствительности образцов волоконно-оптических кабелей. 1 — источник оптического излучения ($\lambda = 1550$ нм, $P_{opt} = 1$ мВт), 2 — оптическое волокно, 3 — оптический циркулятор, 4 — исследуемый образец волоконно-оптического кабеля (чувствительный элемент), 5 — волоконные брэгговские решетки, 6 — фотоприемное устройство, 7 — X-разветвитель, 8 — компенсационный интерферометр с виброзащитным подвесом в герметичном корпусе, 9 — зеркало, 10 — усилитель, 11 — акустическое воздействие, 12 — динамическая головка в акустическом экране, 13 — цифро-аналоговый преобразователь, 14 — аналого-цифровой преобразователь, 15 — схема гомодинной демодуляции сигнала, 16 — персональный компьютер, 17 — оператор.

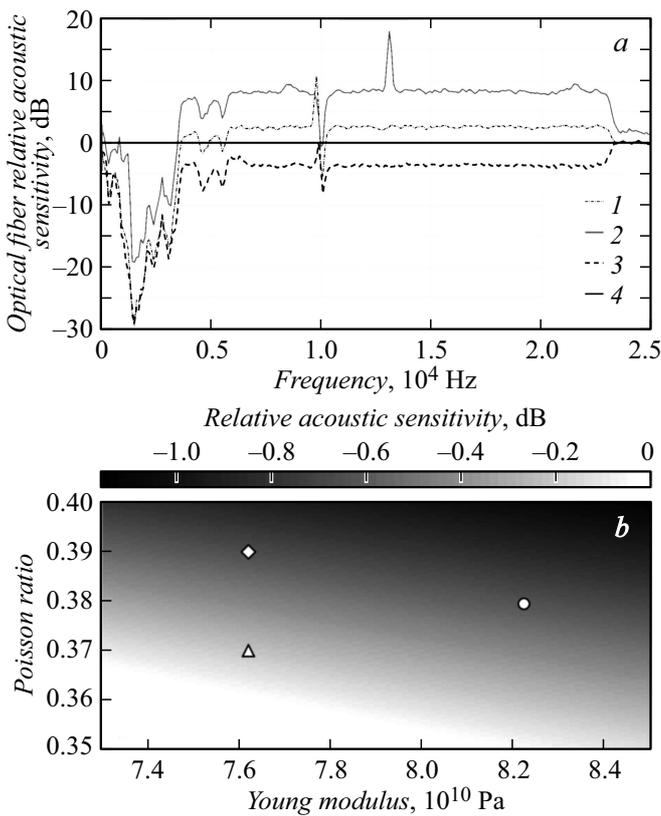


Рис. 3. *a* — экспериментальные спектральные зависимости акустической чувствительности образцов кабелей с различными покрытиями (номера кривых соответствуют номерам образцов), *b* — теоретическая зависимость снижения погонной акустической чувствительности волоконно-оптического кабеля (возникающей разности фаз) в волоконном интерферометре при увеличении эффективного модуля Юнга и эффективного коэффициента Пуассона (для толщины покрытия 1 мм), нормированная на погонную акустическую чувствительность стандартного телекоммуникационного оптического волокна с акрилатной оболочкой. Расчет выполнен для статического давления величиной 1 Па. Точками отмечены расчетные значения относительной акустической чувствительности экспериментальных образцов. Ромб — образец № 1, треугольник — образец № 2, кружок — образец № 3.

собственными резонансными частотами образцов, описываемыми формулой

$$f_e = \frac{\sqrt{ES/Lm}}{2\pi}, \quad (1)$$

где L — длина образца [m], S — площадь сечения образца [m²], m — масса образца [kg]. Так, например, наиболее выраженные резонансные пики экспериментальных образцов в области частот около 10 и 13 kHz совпадают с рассчитанными частотами поперечных резонансов их конструкций (при $L = D$ и определенных взвешиванием массах $m = 35, 21$ и 62 g соответственно для образцов № 1–3; значения E и D взяты из таблицы и рис. 1 соответственно).

Изменение акустической чувствительности при применении покрытий ОВ определялось исходя из сравнения чувствительности экспериментальных образцов равных длин с чувствительностью стандартного одномодового оптического волокна по следующей формуле:

$$\Delta S = 20 \lg \left(\frac{\Delta\varphi_c}{\Delta\varphi_f} \right), \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_c$ — наведенная разность фаз в ОВ с исследуемым покрытием, $\Delta\varphi_f$ — наведенная разность фаз ОВ со стандартным акрилатным покрытием (без защитного покрытия). Эффективность акустической изоляции (шумоподавления) может быть вычислена по той же формуле с обратным выражением под логарифмом.

Разность фаз между плечами волоконного интерферометра при акустическом воздействии на оптическое волокно описывается выражением [13]:

$$\Delta\varphi_f = \frac{2\pi n}{\lambda} PL \left(\left[-\frac{(1-2\mu)}{E} \right] + \left[\frac{n^2}{2E} (1-2\mu)(2p_{12} + p_{11}) \right] \right), \quad (3)$$

где λ — длина волны оптического излучения [m], n — эффективный показатель преломления ОВ [rel. un.], L — длина ОВ [m], P — уровень акустического давления [Pa], μ — коэффициент Пуассона ОВ [rel. un.], E — модуль Юнга ОВ [Pa], p_{12} и p_{11} — элементы матрицы описания эффекта фотоупругости для ОВ [6,13]. На основании данной зависимости был выполнен расчет удельной погонной чувствительности одномодового оптического волокна. При длине волны оптического излучения 1550 nm она составляет около $50 \mu\text{rad/Pa}$ для образца ОВ длиной 1 м. Данное значение использовалось как опорное при сравнении экспериментальных образцов волоконно-оптических кабелей, для которых разность фаз на выходе волоконно-оптического интерферометра описывается следующим образом [6]:

$$\Delta\varphi_c = \frac{2\pi n}{\lambda} PL \left(\left[1 - \frac{n^2}{2} (p_{12} - p_{11}\mu - p_{12}\mu) \right] \times \left[\frac{R^2(1-2\mu') + 2r^2(\mu' - \mu)}{E'(R^2 - r^2) + Er^2} \right] - \left[\frac{n^2}{2} (p_{11} + p_{12}) \frac{1 - \mu - 2\mu^2}{E} \right] \right), \quad (4)$$

где R и r — внешний и внутренний радиусы покрывающего материала [m], E' и μ' — эффективный модуль Юнга и эффективный коэффициент Пуассона, определяющиеся как средневзвешенные по объемной доле отдельных материалов, образующих структуру оболочки

волоконно-оптического кабеля [15]:

$$P_{total} = \sum_i^n \left(\frac{V_{mat_i}}{V_{full}} P_i \right), \quad (5)$$

где P_{total} — результирующее значение искомого параметра, V_{mat_i} — объем, занимаемый данным материалом, V_{full} — общий объем композиции, P_i — параметр данного материала.

Результаты расчетов, нормированные на уровень собственной акустической чувствительности ОВ, представлены на рис. 3, *b*. Полученные результаты указывают на то, что наибольшее снижение чувствительности происходит при одновременном увеличении эффективного модуля Юнга и эффективного коэффициента Пуассона. Из экспериментальных данных видно, что наибольшим шумоподавлением в измеренной полосе частот обладает образец № 3, покрытие которого имеет большое результирующее значение коэффициента Пуассона $\mu = 0.38$ при наибольшем результирующем значении модуля Юнга $E = 82.2$ ГПа. В данной конструкции высокий эффективный модуль Юнга обусловлен наличием стальных жил троса, а высокий коэффициент Пуассона — наличием гидрофобного геля и упругими свойствами спирально скрученных жил стального троса. Эффективность шумоподавления при применении данного покрытия составляет до 30 дБ в диапазоне частот 20–3500 Hz и до 8 дБ в диапазоне частот 4000–20 000 Hz. Из группы образцов № 1, 2 наиболее эффективным оказался образец № 1 с наиболее податливым компаундом ЭВ-2БП-Г ($E = 3$ МПа, $\mu = 0.49$). Эффективность шумоподавления при применении данного покрытия составляет также до 30 дБ в диапазоне частот 20–3500 Hz. Однако для этих образцов при повышении частоты акустического воздействия (выше 3000 Hz) наблюдается увеличение чувствительности, частично обусловленное приближением длины волны акустического воздействия к физической длине исследуемого образца и, как следствие, к частоте продольного резонанса. Так, на частоте 3000 Hz длина звуковой волны в кварцевом оптическом волокне составляет 1.92 м при длине образца 1.44 м. Кроме того, данная частота является границей применимости используемой статической модели оценки акустической чувствительности оптического волокна.

Таким образом, в работе проведено исследование разнотипных волоконно-оптических кабелей для достижения минимальной акустической чувствительности оптического волокна. Основной целью являлось снижение восприимчивости элементов волоконно-оптических интерферометров к акустическим шумам окружающей среды. Данная задача является чрезвычайно актуальной для обеспечения работы волоконно-оптических измерительных систем в реальных условиях. В ходе экспериментальной проверки было определено наиболее эффективное покрытие оптического волокна — оптический кабель с бронированием витым стальным тросом. Его максимальная эффективность акустической изоляции составила до 30 дБ (по сравнению с уровнем акустической

чувствительности ОВ без покрытия) в диапазоне частот 20–3500 Hz. Кроме того, следует отметить, что данный вид защитного покрытия оптического волокна сохраняет свои защитные свойства во всем звуковом диапазоне частот (20–20 000 Hz), в то время как защитные свойства других исследованных типов покрытий заметны только в диапазоне частот 20–3000 Hz при сопоставимых значениях эффективности акустической изоляции.

Финансирование работы

Сотрудники Университета ИТМО выражают благодарность Министерству образования и науки РФ за финансовую поддержку работы в рамках проекта № 03.G25.31.0245.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Cusano A., Cutolo A., Albert J.* Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. Bentham Science Publ., 2011. 322 p.
- [2] *Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S.* // IEEE Sens. J. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150.
- [3] *Freeland R.S., Chow B., Williams J., Godfrey A.* Relative acoustic sensitivity of standard telecom and specialty optical fiber cables for distributed sensing // Fiber optic sensors and applications XIV. Proc. SPIE. 2017. V. 10208. P. 102080M (1–10). DOI: 10.1117/12.2263586
- [4] *Lavrov V.S., Kulikov A.V., Plotnikov M.U., Efimov M.E., Varzhel S.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 735. P. 012014.
- [5] *Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K.* // Adv. Opt. Technol. 2014. V. 2014. P. 815108 (1–5). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/815108>
- [6] *McMahon G.W., Cielo P.G.* // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 22. P. 3720–3722.
- [7] *Lagakos N., Bush I.J., Cole J.H., Bucaro J.A., Skogen J.D., Hocker G.B.* // Opt. Lett. 1982. V. 7. N 9. P. 460–462.
- [8] *Hocker G.B.* // Opt. Lett. 1979. V. 4. N 10. P. 320–321.
- [9] *Yang Y.-C., Lee H.-L., Chou H.-M.* // Appl. Opt. 2002. V. 41. N 10. P. 1989–1994.
- [10] *Lagakos N., Hickman T.R., Cole J.H., Bucaro I.A.* // Opt. Lett. 1981. V. 6. N 9. P. 443–445.
- [11] *Siems L.E., Knapp G., Maida J.* Seismic optical acoustic recursive sensor system. Pat. 6522797. USA, 2003.
- [12] *Poulsen C.V., Hansen L.V., Sigmund O., Pedersen J.E., Beukema M.* Articles comprising an optical fibre with a fibre Bragg grating and methods of their production. Pat. 0183464. USA, 2007.
- [13] *Hocker G.B.* // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 9. P. 1445–1448.
- [14] *Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitrashchenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovsky I.K.* // IEEE Sens. J. 2019. V. 19. N 9. P. 3376–3382.
- [15] DoITPoMS — TLP Library Mechanics of Fibre-Reinforced Composites. Stiffness of long fibre composites [Электронный ресурс]. URL: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre_composites/st (дата обращения: 15.04.2019).