ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 67–72

\_\_\_\_\_ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ \_\_\_\_ ТЕХНИКА

УДК 620.165.29+534.612.3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ АКУСТИЧЕСКОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ЗВУКОЗАЩИТНЫХ КОРПУСОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ<sup>1</sup>

© 2020 г. А. А. Власов<sup>*a*,\*</sup>, А. В. Варламов<sup>*a*,*b*</sup>, А. Н. Аширов<sup>*a*</sup>, Н. Е. Кикилич<sup>*a*</sup>, А. С. Алейник<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,

механики и оптики (Университет ИТМО) Россия, 197101, С.-Петербург, Кронверкский просп., 49 <sup>b</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26 \*e-mail: salusnetklim@yandex.ru Поступила в редакцию 03.03.2020 г. После доработки 13.03.2020 г. Принята к публикации 14.03.2020 г.

Данная статья посвящена исследованию влияния акустических воздействий окружающей среды на работу волоконно-оптических интерферометров и измерительных систем на их основе. Рассматривается способ снижения данного влияния применением акустически подготовленного звукозащитного корпуса для работы при наличии внешних воздействий в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц. Представлена разработанная математическая модель и приведены результаты ее исследования, получена расчетная зависимость степени снижения акустической чувствительности волоконно-оптического интерферометра от степени акустической герметизации его корпуса. Созданы экспериментальная установка и методика экспериментальной оценки степени акустической герметизации при исследовании корпусов устройств.

DOI: 10.31857/S0032816220040357

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время волоконно-оптические фазовые измерительные системы являются наиболее совершенными с точки зрения точностных, массогабаритных и эксплуатационных параметров. Отсутствие механических и токопроводящих частей, высокая помехозащищенность и возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном оптическом волокне (о.в.) привели к широкому развитию таких систем [1]. Принцип действия волоконно-оптических фазовых измерительных систем состоит в интерференции опорного и измерительного оптического сигналов, в общем случае разность фаз между которыми определяет интенсивность интерференционного сигнала согласно выражению

$$I = I_{\mu_{3M}} + I_{on} + 2\sqrt{I_{\mu_{3M}}I_{on}}\cos(\Delta\varphi_{\mu_{3M}} - \Delta\varphi_{on}), \quad (1)$$

где *I*, Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность интерференционного сигнала;  $I_{\rm изм}$ , Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность измерительного сигнала;  $I_{\rm оп}$ , Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность опорного сигнала;  $\Delta \phi_{\rm изм}$ , рад – разность фаз, наводимая воздействием измеряемой величины на чувствительное плечо интерферометра;  $\Delta \phi_{\rm on}$ , рад – разность фаз в опорном плече интерферометра.

При работе в реальных условиях интерферометр подвергается внешним акустическим воздействиям окружающей среды, что приводит к возникновению дополнительной разности фаз на его опорном плече [2]:

$$\Delta \varphi_{\text{on}} = \frac{2\pi nL}{\lambda} \times \left( -\frac{(1-2\mu)}{E} + \left[ \frac{n^2}{2E} (1-2\mu)(2p_{12}+p_{11}) \right] \right) \Delta P, \qquad (2)$$

где  $\lambda$ , м — длина волны оптического излучения; n — эффективный показатель преломления о.в.; L, м — длина о.в.;  $\Delta P$ , Па — уровень звукового давления;  $\mu$  — коэффициент Пуассона о.в.; E, Па —

Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции "Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020" (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).



Рис. 1. Принцип распространения акустического воздействия: 1 – внешнее акустическое воздействие; 2 – корпус изделия; 3 – структурная волна в конструкции корпуса, вызванная внешним акустическим воздействием; 4 – прямая воздушная волна, проникающая через отверстия в корпусе; 5 – воздушная волна, вызванная колебанием поверхности корпуса под действием структурной волны 3; 6 – структурная волна, распространяющаяся через конструкцию корпуса; 7 – защищаемый объект.

модуль Юнга о.в.;  $p_{12}$  и  $p_{11}$  — элементы матрицы описания эффекта фотоупругости для о.в.

Данная проблема является особенно актуальной при разработке измерительных систем на принципах PMDI-интерферометрии (path matched differential interferometry – дифференциальная интерферометрия с согласованными траекториями), когда для снижения требований к длине когерентности зондирующего оптического излучения в состав оптической схемы вводится компенсационный интерферометр (к.и.). Компенсационный и измерительные (чувствительные) интерферометры (ч.и.), как правило, разнесены в пространстве и в этом случае внешние акустические воздействия на них некоррелированы, в результате чего в выходном сигнале волоконно-оптических фазовых измерительных систем присутствует неотделимая от полезного сигнала составляющая, обусловленная внешним акустическим воздействием на компенсационный интерферометр [3-6]:

$$I = I_{_{\text{Y},\text{M}.}} + I_{_{\text{K},\text{M}.}} + 2\sqrt{I_{_{\text{Y},\text{M}.}}I_{_{\text{K},\text{M}.}}} \cos(\Delta\varphi_{_{\text{Y},\text{M}.}} - \Delta\varphi_{_{\text{K},\text{M}.}}), \quad (3)$$

где *I*, Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность интерференционного сигнала;  $I_{\text{ч.и.}}$ , Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность оптического сигнала в чувствительном интерферометре;  $I_{\text{к.и.}}$ , Вт/м<sup>2</sup> – интенсивность оптического сигнала в компенсационном интерферометре;  $\Delta \phi_{\text{ч.и.}}$ , рад – разность фаз, наводимая воздействием измеряемой величины в чувствительном интерферометре;  $\Delta \phi_{\text{к.и.}}$ , рад – разность фаз, наводимая внешним акустическим (помеховым) воздействием в компенсационном интерферометре.

Не менее актуальной данная проблема является и при разработке волоконных лазеров, внешнее акустическое воздействие на резонаторы которых вызывает сдвиг центральной длины волны их излучения [6, 7]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(\frac{(2\mu - 1)}{E} - \left[\frac{n^2}{2E}(2\mu - 1)(2p_{12} + p_{11})\right]\right)\Delta P, \quad (4)$$

где λ, м — центральная длина волны оптического излучения лазера; Δλ, м — сдвиг центральной волны оптического излучения лазера.

Таким образом, внешнее акустическое воздействие на такие компоненты волоконно-оптических измерительных систем, как интерферометры и волоконные лазеры, приводит к снижению точностных параметров: ухудшению отношения сигнал/шум, снижению минимально обнаружимого воздействия и сужению динамического диапазона.

Данная работа посвящена снижению влияния шумов окружающей среды на точностные и эксплуатационные параметры волоконно-оптических фазовых измерительных систем. Задачами данной работы являются поиск способов построения акустически подготовленных звукозащитных корпусов волоконно-оптических интерферометров и изучение влияния их параметров на снижение уровня звукового давления на волоконно-оптические интерферометры.

# СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ШУМОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В зависимости от среды распространения колебаний акустическое воздействие может быть разделено на воздушный и структурный шум. Воздушный шум распространяется в газообразной среде, средой распространения структурного шума является твердое тело. При этом взаимодействие акустической воздушной волны с твердой преградой приводит к возникновению в последней структурных колебаний. В свою очередь, структурные колебания поверхности твердого тела приводят к возникновению воздушной акустической волны. В результате этого в реальных условиях результирующее акустическое воздействие в точке измерения имеет чрезвычайно сложный характер. Процесс распространения акустического воздействия поясняется рис. 1.

Снижение уровня звукового давления, действующего на опорное плечо волоконно-оптического интерферометра может быть достигнуто применением корпуса устройства, спроектированного с целью внесения затухания для распространяющихся воздушной и структурной волн акустического воздействия. Для ослабления прямой воздушной волны применяют корпуса из плотных и жестких материалов с высоким показателем модуля Юнга, при этом достигается максимальный коэффициент отражения, а также повышается степень герметизации корпуса [8]. Степень акустической герметизации может быть оценена по формуле [8]

$$AH = \frac{\sum_{i=1}^{k} S_{h_i}}{S_{tot}} \times 100\%, \qquad (5)$$

где  $S_{h_i}$ , м<sup>2</sup> — площадь *i*-го отверстия корпуса; k — число отверстий;  $S_{tot}$ , м<sup>2</sup> — полная площадь поверхности корпуса.

Для снижения интенсивности структурной волны, распространяющейся в материале корпуса, применяют вязкоупругие покрытия (битум, каучук и др.), обладающие высоким коэффициентом механических потерь [8]. Зачастую применяют размещение распределенной массы поверх данных покрытий, повышающее степень подавления нежелательного воздействия за счет образования дополнительного колебательного контура с высокими потерями [8]. По такому принципу могут быть сформированы многослойные конструкции для расширения диапазона частот эффективной работы и увеличения степени подавления.

Для снижения интенсивности вторичной воздушной волны, вызванной звукоизлучением конструкции корпуса, его внутренняя поверхность может быть покрыта звукопоглотителями из волокнистых и пористых материалов [8, 9].

Для повышения результирующей эффективности шумозащитных мер внутри акустически подготовленных устройств могут применяться защитные покрытия оптического волокна [3, 4, 6, 10], а также оптические схемы, позволяющие осуществлять компенсацию внешних акустических воздействий на интерферометр [11].

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ходе данной работы предложена математическая модель, разработанная на основе адаптации подходов инженерной и архитектурной акустики (снижение уровня воздушного шума тонкой плоской ограждающей конструкцией) для совместного применения со статической моделью акустической чувствительности оптического волокна в случае равномерного изотропного сжатия [2–4, 10, 12].

Модель описывает снижение фазовой акустической чувствительности  $\Delta \phi_{on}$  опорного плеча волоконно-оптического интерферометра внутри акустически подготовленного корпуса в зависимости от его параметров: геометрические размеры, материал и толщина стенок, коэффициент механических потерь применяемого вязкоупругого слоя, степень акустической герметизации, площадь покрытия внутреннего объема звукопоглощающим материалом и его коэффициент звукопоглощения.

Уровень акустической чувствительности, дБ



Рис. 2. Сравнение экспериментальных результатов и результатов работы модели: 1 – снижение уровня фазовой акустической чувствительности применением корпуса с известными параметрами, 2 – уровень 0 дБ (без корпуса), 3 – результат моделирования снижения уровня фазовой акустической чувствительности с применением корпуса с известными параметрами.

Достоверность разработанной математической модели подтверждается высокой степенью сходимости результатов, полученных при моделировании, с результатами экспериментальной проверки степени снижения уровня акустического давления корпусом с известными параметрами [4] в звуковом диапазоне частот от 20 до 20000 Гц (рис. 2). Методика измерений подробно описана в работах [3, 4, 6].

Линейный критерий корреляции Пирсона для результатов работы модели и результатов обработки экспериментальных данных при идентичных параметрах исследуемого корпуса составил 0.908. Неполная сходимость модели с экспериментальной кривой объясняется расхождением в результате неизбежного технологического разброса действительных значений параметров применяемых материалов от полученных из справочных данных. Степень акустической герметизации *АН* исследуемого корпуса составляла около 1%.

Далее было проведено исследование разработанной модели в диапазоне частот от 20 до 5000 Гц для определения факторов, наиболее серьезно влияющих на уровень снижения акустической чувствительности. В ходе исследования было установлено, что таким фактором, прежде всего, является степень акустической герметизации защитного корпуса АН [%]. Семейство спектров для оценки влияния степени герметизации АН корпуса представлены на рис. 3. Видно, что при наличии щелей, суммарная площадь которых составляет всего 1% от общей площади внутренней поверхности корпуса, звукоизоляция существенно (до 20 дБ) снижается. Согласно данным, полученным при моделировании, связь между степенью герметизации корпуса АН [%] и максимальной степенью снижения акустической чувствительУровень акустической чувствительности, дБ



**Рис. 3.** Зависимость уровня фазовой акустической чувствительности волоконно-оптического интерферометра от степени акустической герметизации внешнего корпуса: 1 - при степени акустической герметизации 0%, 2 - 1%, 3 - 2%, 4 - 3%, 5 - 5%, 6 - 7%, 7 - 10%, 8 - уровень 0 дБ (без корпуса).

ности  $\Delta S_{case}$  [дБ] может быть описана следующим выражением (при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9221$ ):

$$\frac{|\Delta S_{case}| \sim -0.1101(AH)^3 - 2.0719 (AH)^2 - -12.401(AH) + 26.82.}{(6)}$$

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Оценка степени акустической герметизации корпуса является достаточно нетривиальной задачей, так как ввиду сложности конструкции не все его отверстия и щели могут быть доступны для прямого измерения. В теории течеискания вакуумных систем и трубопроводов данная задача решается применением так называемых способов повышения или понижения давления. Суть данных способов заключается в следующем: внутри исследуемого объема V создается повышенное либо пониженное давление, динамика изменения уровня которого во времени фиксируется при помощи датчика давления. В работе [13] приведена экспериментальная зависимость диаметра отверстия D от уровня утечки давления, которая может быть аппроксимирована следующим выражением (при достоверности аппроксимации  $R^2 = 1$ ):

$$D = 0.0001 \sqrt{\frac{V_l \Delta P_{mb}}{\Delta t}},\tag{7}$$

где  $V_i$ , л — объем исследуемого корпуса;  $\Delta P_{mb}$ , мбар — изменение уровня давления;  $\Delta t$ , с — временной интервал изменения уровня давления.

Таким образом, суммарная площадь отверстий исследуемого корпуса может быть оценена при помощи следующего выражения (при достоверности аппроксимации  $R^2 = 1$ ):



Рис. 4. Экспериментальная установка для оценки степени акустической герметизации корпуса. 1 – компрессор с ресивером; 2 – запорная арматура; 3 – микроконтроллер; 4 – исследуемый корпус; 5 – датчик давления; 6 – разрушаемый резервуар из эластичного материала; ПК – персональный компьютер.

$$\sum S_h = (8 \cdot 10^{-8}) \left( \frac{V_m \Delta P_{pa}}{\Delta t} \right), \tag{8}$$

где  $V_m$ , м<sup>3</sup> — объем исследуемого корпуса;  $\Delta P_{pa}$ , Па — изменение уровня давления.

Для проведения экспериментальной оценки степени акустической герметизации корпуса была создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 4. С учетом того, что ожидаемая суммарная площадь щелей и отверстий корпуса может составлять значительную долю от общей площади его внутренней поверхности, а значит, процесс выравнивания давления будет быстропротекающим, производительность компрессора и скорость срабатывания запорной арматуры должны обеспечивать возможность нагнетания импульса давления значительной амплитуды с резкими фронтами. В случае, если это невозможно или затруднительно, предлагается применение дополнительного разрушаемого резервуара-накопителя из эластичного материала (6 на рис. 4) внутри исследуемого корпуса. При поступлении давления от компрессора он начинает расширяться, препятствуя утечке нагнетаемого давления во внешнюю среду. При превышении давлением внутри резервуара-накопителя предела его прочности происходит его разрушение, сопровождающееся быстропротекающим всенаправленным ударным истечением воздуха во внешнюю среду через щели и отверстия исследуемого корпуса. Таким образом, за счет того, что волна давления образуется за счет мгновенного разрушения резервуара-накопителя, для его первоначальной накачки может быть использован любой источник воздушного давления, а в качестве резервуара-накопителя – резиновый баллон, воздушный шар и пр.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результат экспериментальной проверки степени акустической герметизации исследуемого корпуса представлен на рис. 5. В качестве разрушаемого резервуара-накопителя применялся воздушный шарик из плотной резины (арт. № GM120ASS 1101-0008 14"). Запорная арматура обеспечивала поступление воздуха от компрессора DV-370-50, выходное давление которого было ограничено редуктором на уровне 700 кПа. При разрыве резервуара-накопителя поступление давления прекращалось путем перекрытия воздушного клапана. Мониторинг давления внутреннего объема исследуемого корпуса осуществлялся цифровым датчиком давления HSCMRNN1.6BASA3 с частотой опроса 2 кГц и абсолютной погрешностью проводимых измерений ±1%.

Анализ экспериментальных данных показывает, что ударное истечение воздуха при разрушении резервуара-накопителя провоцирует начало переходного процесса установления давления с уровня ( $P_{amb} + \Delta P_{max}$ ) до уровня  $P_{amb}$  ( $P_{amb}$ , Па – уровень постоянного (атмосферного) давления;  $\Delta P_{\text{max}}$ , Па – уровень повышения давления при разрушении накопителя). Разрыв применяемого резервуара в корпусе с объемом 10 л вызывает скачок давления на уровне 25 кПа. Переходный процесс считают установившимся при достижении изменяющейся величиной значения, отличающегося от установившегося не более чем на 5% [14]. В данном случае переходный процесс считался оконченным при истечении 95% избыточного давления из исследуемого объема. Экспериментальные данные, соответствующие диапазону изменения давления  $[P_{amb} + \Delta P_{max}; P_{amb}]$ , могут быть описаны эмпирическим выражением (при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.8781$ ):

$$P(t) = 0.01272e^{-9.162t} + 1.075 \cdot 10^5 e^{-0.03822t}.$$
 (9)

Пересечение аппроксимирующей кривой и прямой, соответствующей уровню давления ( $P_{amb}$  +  $+ 0.05\Delta P_{max}$ ), позволяет найти точку, в которой переходный процесс устанавливается, и, соответственно, получить  $\Delta P_{pa} = 0.95\Delta P_{max}$  и  $\Delta t$  суммарной площади щелей и отверстий исследуемого корпуса согласно выражению (8). Временной интервал  $\Delta t$  составил около 0.005 с, величина утечки давления составила порядка 51 кПа · ( $M^3/c$ ), что соответствует суммарной площади щелей и отверстий ~41 см<sup>2</sup>, эквивалентной степени акустической герметизации около  $AH \approx 1\%$ .

Колебания уровня давления в оставшейся части переходного процесса могут быть объяснены колебаниями массы воздуха по причине его упругих свойств при переотражениях внутри корпуса, колебаниями стенок корпуса при ударном воздей-



**Рис. 5.** Результат экспериментального исследования степени акустической герметизации защитного корпуса: 1 – уровень постоянного (атмосферного) давления ( $P_{amb}$ ), 2 – экспериментальные данные при разрыве разрушаемого резервуара-накопителя, 3 – уровень 5% от  $\Delta P_{max}$  ( $P_{amb}$  + 0.05 $\Delta P_{max}$ ), 4 – аппроксимирующая функция для экспериментальных данных, 5 – точка начала измерения длительности переходного процесса и начального уровня давления, 6 – точка окончания измерения длительности переходного процесса и установившегося уровня давления.

ствии, а также влиянием задержки срабатывания запорной арматуры клапана подачи давления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был проведен обзор научно-технической литературы по тематике влияния шумов окружающей среды на работу волоконно-оптических фазовых измерительных систем, выявлены основные подходы к снижению чувствительности опорного плеча волоконно-оптических интерферометров к внешним акустическим воздействиям. Показано, что для повышения точностных и эксплуатационных параметров волоконно-оптических измерительных систем на основе интерферометров необходимым является применение акустически подготовленных шумозащитных корпусов устройства.

Для выявления наиболее важных параметров корпуса была разработана математическая модель, учитывающая такие параметры, как геометрические размеры, материал и толщина стенок, коэффициент механических потерь применяемого вязкоупругого слоя, степень акустической герметизации, площадь покрытия внутреннего объема звукопоглощающим материалом и его коэффициент звукопоглощения. Получена теоретическая зависимость максимальной степени снижения акустической чувствительности  $\Delta S_{case}$  от степени акустической герметизации корпуса. Для практических применений была создана экспериментальная установка и предложена методика оценки степени акустической герметизации корпусов *АН* на основе применения метода повышения давления с использованием разрушаемого резервуара-накопителя из эластичного материала, что позволяет существенно снизить требования к источнику воздушного давления. Степень акустической герметизации исследуемого корпуса составила около 1%.

Созданные математическая модель и экспериментальная установка могут быть применены в различных областях науки и техники при решении задач защиты чувствительных компонентов от внешних акустических воздействий, а также для экспериментальной оценки степени акустической герметизации корпусов устройств.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation / Ed. by *A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert.* Hoboken (NJ): Bentham Science Publishers, 2011.
- 2. Hocker G.B. // App. Optics. 1979. V. 18. № 9. P. 1445.
- Vlasov A.A., Aleynik A.S., Ashirov A.N., Plotnikov M.Yu., Varlamov A.V. // Technical Phys. Lett. 2019. V. 45. № 8.

P. 769.

https://doi.org/10.1134/S1063785019080157

- Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Aleinik A.S., Varlamov A.V.//J. Phys.: Conference Series. IOP Publishing, 2019. V. 1326. № 1. P. 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1326/1/012010
- Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovsky I.K. // IEEE Sensors J. 2019. T. 19. № 9. C. 3376. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894323
- 6. Vlasov A.A., Plotnikov M.Y., Ashirov A.N., Aleynik A.S., Varlamov A.V., Stam A.M. // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics
- (EExPolytech). IEEE. 2019. P. 305. https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889
- Azmi A.I., Leung I., Chen X., Zhou S., Zhu Q., Gao K., Childs P., Peng G. // Photonic Sensors. 2011. V. 1. № 3. P. 210.
- Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Защита от шума и вибрации. СПб.: Печатный цех, 2019. ISBN 978-5-60424483-8.
- 9. *Герасимов А.И., Васильев М.Д., Светлоруссова А.М. //* Noise Theory and Practice. 2019. V. 5. № 4 (18). Р. 46.
- McMahon G.W., Cielo P.G. // Appl. Optics. 1979. V. 18. № 22. P. 3720
- 11. Baney D.M., Van Wiggeren G.D., Motamedi A. Pat. 6825934 USA. 2004.
- СП 275.1325800.2016 "Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции".
- 13. Основы течеискания, Leybold GmbH. https://leybold.ru/pdf/osnovi-techeiskanie-leybold.pdf
- Пономарев В.М., Литвинов А.П. Основы автоматического регулирования и управления. М.: Высшая школа, 1974.