

УДК 550.834+681.787+681.7.063+681.7.068

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-574-585

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ШУМОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ БУКСИРОВКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОС С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

А.А. Власов, А.С. Алейник, М.Ю. Плотников, А.А. Дмитриев, С.В. Варжель

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: salusnetklim@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 19.04.19, принята к печати 21.05.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Власов А.А., Алейник А.С., Плотников М.Ю., Дмитриев А.А., Варжель С.В. Методы снижения механических шумовых воздействий при буксировке сейсмических кос с применением волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 574–585. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-574-585

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследована проблема осуществления буксировки сейсмических кос при проведении морских геологоразведочных работ. Представлена классификация возникающих при осуществлении буксировки механических шумовых воздействий. Выполнен обзор основных технических решений для борьбы с каждым видом таких воздействий. **Метод.** Предложена методика расчета параметров эластичных секций для подавления шумовых воздействий, требующая учета уровня натяжения буксируемого тела. Показана возможность и перспективы применения для этой цели волоконно-оптической тензометрической системы на основе записанных в телекоммуникационном оптическом волокне SMF-28 стандарта G.657.A1 решеток Брэгга с частотой опроса 5 кГц непосредственно в составе конструкции волоконно-оптической сейсмической косы. **Основные результаты.** Приведены экспериментальные данные исследования прототипа такой системы. При относительном удлинении балки, равном сопротивлению изгиба в диапазоне до 1030 мкм/м, достигнута средняя чувствительность 0,68 пм/(мкм/м), разброс значений составил ±1пм. Показано, что работа самих волоконных решеток Брэгга носит практически безинерционный характер. Время срабатывания и динамический диапазон по амплитуде воздействия датчика в большей степени определяется свойствами металлических балок и оснастки, в которых фиксируются оптические волокна. **Практическая значимость.** Применение метода представляет возможность построения безразрывного буксируемого тела. Показаны возможности расчета параметров эластичных секций под конкретные условия проведения геологоразведочных работ и непрерывного мониторинга состояния буксируемого тела. Появляется возможность контроля качества регистрируемых сейсмических данных и частичной компенсации нежелательных воздействий при обработке сигналов. Предлагаемые мероприятия позволяют значительно увеличить точность и достоверность получаемой геологической информации.

### Ключевые слова

волоконно-оптическая буксируемая коса, сейсмическая разведка, шумовые воздействия, волоконная брэгговская решетка, контроль качества

### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 03.G25.31.0245).

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-574-585

## METHODS OF MECHANICAL NOISE IMPACT SUPPRESSION DURING STREAMER TOWING PROCESS USING FIBER BRAGG GRATINGS

A.A. Vlasov, A.S. Aleynik, M.Yu. Plotnikov, A.A. Dmitriev, S.V. Varzhel

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: salusnetklim@yandex.ru

### Article info

Received 19.04.18, accepted 21.05.19  
 Article in Russian

**For citation:** Vlasov A.A., Aleynik A.S., Plotnikov M.Yu., Dmitriev A.A., Varzhel S.V. Methods of mechanical noise impact suppression during streamer towing process using fiber Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 574–585 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-574-585

## Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with the problem of seismic streamers towing process during marine geological exploration. Classification of the mechanical noise effects during towing process is presented. A brief overview of the main technical solutions is performed for suppression of each impact type. **Method.** A method is proposed for calculating the parameters of elastic sections for suppression of noise effects, which takes into account towed body tension level. We show the possibility and prospects of applying for this purpose a fiber-optic strain measurement system based on Bragg gratings inscribed in the G.657.A1 standard SMF-28 telecommunication optical fiber with a sampling rate of 5 kHz as part of a fiber-optic seismic streamer design. **Main Results.** Experimental data on the prototype research are given. With the relative elongation of the uniform-strength bar in the range up to 1030  $\mu\text{m}/\text{m}$ , an average sensitivity of 0.68 pm ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) is achieved, and the spread of values is  $\pm 1$  pm. It is shown that the work of fiber Bragg gratings is practically non-inertial itself. The response time and dynamic range of the sensor amplitude is largely determined by the properties of metal bars and tool set where optical fibers are fixed. **Practical Relevance.** Application of the method provides opportunities for the solid construction of the towed body. The possibilities for calculation of the elastic section parameters to the specific conditions of marine geological exploration and continuous state monitoring of the towed body are presented. The method makes it possible to control the quality of the recorded seismic data and partially compensate the undesirable effects during signal processing. Proposed measures will increase significantly the accuracy and reliability of the obtained geological data.

## Keywords

fiber-optical towed streamer, seismology exploration, noise impacts, fiber Bragg grating, quality control

## Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The unique identifier of the project No. 03.G25.31.0245).

## Введение

В последние годы в мировой экономике сохраняются тенденции неуклонного роста потребления нефти и нефтепродуктов, которое достигает 2–3 т на человека в год в лидирующих по экономическому развитию странах [1, 2]. Подобные тенденции приводят к необходимости поисков и освоения новых месторождений углеводородов на различных территориях России, а важнейшими из них становятся шельфовые акватории. Для дальнейшего освоения арктического шельфа и открытия новых месторождений необходимо проведение на нем геофизических сейсморазведочных работ. Среди всех современных методов предварительной разведки полезных ископаемых наиболее достоверными являются сейсмические методы, результатом которых являются детальные сведения об акустических свойствах изучаемого геологического разреза. Акустические свойства в свою очередь определяются наличием и составом отложений в океаническом шельфе, что является основой для геофизической интерпретации основных сейсмических результатов: прогнозирования геологического строения изучаемой территории и месторождений полезных ископаемых (нефти, природного газа, угля, руд и т. д.) [1, 2]. Оборудование для проведения сейсморазведки включает в себя источник и приемник акустического сигнала. Принцип проведения подобной геологической сейсмической съемки основан на регистрации искусственно возбуждаемых упругих волн и выделении из них полезной геолого-геофизической информации [3]. Источниками сейсмосигнала в зависимости от условий проведения съемки могут быть пневматические или электроразрядные комплексы. В качестве приемников акустического сигнала обычно используют протяженные буксируемые сейсмические косы [3]. В силу истории развития техники на сегодняшний день лидирующее положение на рынке занимают пьезоэлектрические косы, но в последние годы наблюдается высокий интерес к разработке измерительных систем с чувствительными элементами на основе волоконно-оптических датчиков [4–15] ввиду присущих им достоинств: низкие массогабаритные параметры, абсолютная нечувствительность к электромагнитным помехам, высокая чувствительность и широкий динамический диапазон, возможность эффективного мультиплексирования большого числа чувствительных элементов на одном волокне, отсутствие токопроводящих элементов в чувствительной части и др. Однако и такие системы имеют тенденцию к снижению своих точностных параметров при работе в реальных условиях. Для успешного решения данной проблемы необходимо произвести классификацию шумовых воздействий и разработать технические решения для борьбы с каждым из них.

## Классификация шумовых воздействий

В процессе буксировки сейсмической косы на нее действуют следующие виды шумовых воздействий (места их возникновения указаны на схеме буксировки на рис. 1, нумерация соответствует нумерации списка):

- 1) рывковые воздействия, возникающие по причине неравномерности хода судна-буксира [16–20];
- 2) вибрационная волна от машин и агрегатов судна, распространяющаяся вдоль тела косы [21, 22];
- 3) шумы обтекания косы водой [4, 23–30];
- 4) рывковые воздействия, оказываемые буйками и концевым телом [16, 31].

Основным результатом шумовых воздействий на сейсмическую косу при ее буксировке является повышение уровня шума в сигналах с гидрофонов сейсмической косы и, как следствие, ухудшение соотношения сигнал-шум регистрируемых сейсмоакустических сигналов. Поскольку шумовые воздействия имеют

широкий спектр, оценка их величины должна производиться в той же частотной области, в которой находится полезный сейсмоакустический сигнал. Как правило, наиболее полезной с точки зрения сейсмических измерений является низкочастотная область до нескольких сотен герц, поскольку в этой области акустические волны претерпевают наименьшее затухание в воде и донных породах. В то же время шумовые воздействия при буксировке также преимущественно сосредоточены в низкочастотной области. Поэтому снижение уровня шумов при буксировке сейсмических кос в низкочастотной области является важной задачей.

Значительное влияние на уровень шума при буксировке оказывает конструкция буксируемой сейсмической косы в части диаметра, однородности диаметра по длине, шероховатости поверхности кабеля косы и конструкция используемых гидроакустических преобразователей. Таким образом, проектирование косы должно осуществляться с учетом минимизации помех при ее буксировке.

Основным критерием качества подавления шумов буксировки сейсмических кос является отношение уровня шума при буксировке в отсутствие полезных сейсмоакустических сигналов к уровню собственных шумов гидрофонов буксируемой сейсмической косы в лабораторных условиях (в заглушенной камере при гидростатическом давлении и отсутствии внешних акустических и вибрационных воздействий). Чем ближе уровень шума косы при буксировке к уровню собственного шума, зарегистрированного в отсутствие внешних воздействий, тем лучше уровень подавления шумов буксировки.

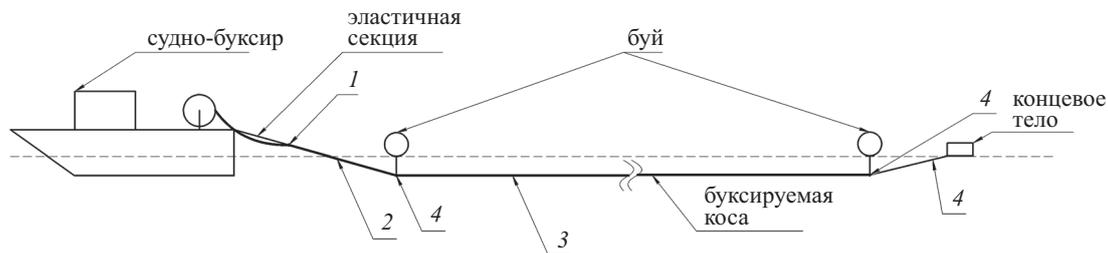


Рис. 1. Классификация шумовых воздействий при буксировке косы

### Рывковые воздействия судна-буксира

Основными причинами возникновения данного вида шумовых воздействий являются неравномерности скорости хода судна-буксира, особенно при движении по волнам [16–20]. Проявляются данные воздействия в виде изменения величины натяжения буксируемой косы, что приводит к соответствующему изменению скорости движения самой косы, изменению ее длины, а также попутному увеличению шумов обтекания (так как их интенсивность зависит также и от скорости буксировки) [4, 24, 29]. Шумовые воздействия данного типа относительно низкочастотны (единицы и десятки герц), что обусловлено большой массой и инертностью судна, а также волнением на море.

Ослабление таких воздействий достигается применением эластичных секций, выполненных из упругого материала и расходующих энергию рывка на изменение длины самой секции без передачи к чувствительной части. Такие секции могут как входить в состав кабеля [19], так и быть выполненными в виде отдельных достаточно сложных устройств, монтаж которых осуществляется в разрыв тела косы [16–18, 20]. При этом конструкции с возможностью демпфирования применяются в основном для гашения крайне резких воздействий (зацепление, резкий старт и др.) [17, 18]. В [16] описывается конструкция эластичной секции, в которой силовой элемент обернут вокруг центрального стержня, выполненного из эластичного материала. При появлении растягивающей нагрузки выполняется ее гашение путем сдавливания эластичного элемента. Аналогичный принцип действия заложен в конструкциях [19] и [20], но в [19] эластичный элемент выполнен в виде стержня с переменным диаметром, что позволяет осуществить реализацию эластичной секции с переменной жесткостью. В конструкциях [17] и [18] предусмотрена возможность демпфирования сильных рывков; в [17] — за счет применения двухпружинной схемы, а в [18] — за счет применения демпфирующих полостей, потеря механической энергии в которых обусловлена перетеканием забортной воды через узкие отверстия.

### Вибрационная волна от агрегатов судна-буксира

Причиной возникновения этого вида механических воздействий является распространение колебаний движущихся механизмов судна-буксира (двигатели, вентиляционные установки, валы и др.) вдоль тела косы к чувствительным элементам [22]. Соответственно частоты данных воздействий определяются частотами оборотов вызывающих их механизмов. Особо серьезный характер действие данного шумового фактора приобретает в случае с жидкостнонаполненными косами ввиду малой сжимаемости жидкости — коэффициент передачи шумовых воздействий к чувствительным элементам возрастает. Гашение вибрационной волны выполняется при помощи встраиваемых или накладных поглотителей [21, 22]. Такие поглотители выполняются из материалов с высоким коэффициентом механических потерь (например, из бутиловой резины). В [21]

описывается конструкция накладного поглотителя вибрационной волны, выполненного в виде резиновой секции и металлической части, обеспечивающей механическую прочность и плотное прижатие резины к защищаемому объекту. В [22] описывается конструкция поглотителя, входящего в структуру кабеля. Для волоконно-оптических измерительных систем на основе фазовых датчиков данный тип механических воздействия представляет собой фактор, серьезно ограничивающий их точность и динамический диапазон. Это происходит по причине действия данных вибрационных волн и акустического шума окружающей среды на бортовую часть таких систем, в частности, на волоконно-оптический интерферометр. При таких воздействиях в его плечах наводится дополнительная разность фаз, повышающая уровень шума в результирующем выходном сигнале сейсмической буксируемой косы. Ввиду того, что, как правило, частоты вибрационных и акустических волн лежат внутри частотного диапазона работы измерительных систем, такие воздействия невозможно отделить от измеренного сигнала. Тематике защиты чувствительных плеч волоконно-оптических интерферометров посвящено большое количество исследований [32–44].

### **Шумы обтекания буксируемой косы водой**

Причиной возникновения данного вида шумовых воздействий является движение протяженного тела в жидкости, в результате которого образуются турбулентные потоки жидкости, образующие области переменного давления в пограничном слое между косой и жидкостью [4, 23–30]. Области переменного давления приводят к возникновению шумового сигнала на чувствительных элементах буксируемой косы, уровень которого зависит от скорости буксировки и составляет от 20–80 дБ (относительно уровня 1 мкПа<sup>2</sup>/Гц) при скорости буксировки 1 м/с до 100–120 дБ при скорости буксировки 8 м/с в полосе частот 0–500 Гц [4]. В случае применения пьезоэлектрических кос данный шумовой фактор становится более серьезным, так как под воздействием переменного давления происходит ионизация диэлектрика по причине его сжатия, что приводит также и к генерации электрических шумов [26]. Идея защиты от шумов такого вида состоит в противодействии образованию потоков жидкости (применение различного вида гребенок и обтекателей) [23] и/или выравниванию давления в приграничном слое (заполнение пограничного слоя высокомолекулярным полимером [27] и применении покрытий из бутиловой резины [22] для осуществления демпфирования сил, возникающих при перемене давления в данном слое). Кроме того, очень большое внимание уделяется контролю положения буксируемой косы в пространстве с целью поддержания наименьшей площади взаимодействия с потоками воды [24].

### **Рывковые воздействия буйков и концевого тела**

Причиной возникновения этого вида шумовых воздействий является неравномерное движение буйев и концевого тела по водной поверхности в отсутствие волнения и особенно при его наличии [16, 31]. Для снижения интенсивности этого вида шумов предпочтительно применение объемных притопленных твердотельных буйев обтекаемой формы, так как они обладают большей инерцией по сравнению с малыми воздушными буйами, движущимися непосредственно по поверхности и соответственно более восприимчивы к возмущающим воздействиям. Данные рывковые воздействия, как и рывковые воздействия судна-буксира, также устраняются путем применения эластичных секций [16], однако по аналогии с автомобильной промышленностью [45–47] существуют разработки активных систем подавления колебаний буйев и концевых тел на волнах [31]. Данный вид шумовых воздействий является более высокочастотным, нежели рывковые воздействия судна буксира, главным образом по причине меньшей инерции буйев и концевых тел по сравнению с инерцией корабля. В [31] описывается конструкция бую с активным шумоподавлением, принцип действия которого основан на очень быстром изменении моторизованной катушкой длины соединяющего буй и буксируемое тело троса при детектировании входящим в состав бую акселерометром ускорения (при поднятии/опускании бую на волнах). Таким образом, рывковое воздействие практически не передается на буксируемое тело. В составе активного бую также присутствуют элементы с переменной вязкостью, обеспечивающие настраиваемое демпфирование активной системы шумоподавления. Кроме того, волоконно-оптический акселерометр может быть включен в состав волоконно-оптического кабеля для обеспечения детектирования рывковых воздействий [48] и мониторинга параметров косы в процессе буксировки.

### **Применение волоконных решеток Брэгга для расчета параметров эластичных шумозащитных секций**

Требуемые параметры эластичной демпфирующей секции для подавления рывковых воздействий судна-буксира, буйков и концевого тела могут быть оценены при помощи предлагаемой методики. Согласно первому закону Ньютона, равномерное прямолинейное движение тела подобно состоянию покоя, когда на тело не действуют силы или их действие скомпенсировано; соответственно применение эластичной секции позволяет скомпенсировать неравномерность в силе тяги судна-буксира и возникающие в связи с ними ускорения.

При буксировке косы вдоль оси движения судна на нее действует сила тяги, которая в случае равномерного прямолинейного движения уравновешена силой натяжения  $F_{ur}$ , действующей со стороны концевой тела. Данная система подобна математическому маятнику, и частота ее собственных колебаний равна [49]:

$$f_e = \frac{\sqrt{\frac{a_x k}{F_H}}}{2\pi},$$

где  $a_x$  — проекция действующего на буксируемую косу ускорения рывкового воздействия, м/с<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент жесткости эластичной секции, Н/м.

С другой стороны, при помощи метода электромеханических аналогий [50] такая система может быть уподоблена LC-фильтру нижних частот [51] (рис. 2) с частотой среза, равной частоте ее собственных колебаний  $f_e$ ; масса  $m$  (или, согласно второму закону Ньютона,  $F_H/a_x$ ) подобна индуктивности  $L$ ,  $k$  подобно величине, обратной электрической емкости  $1/C$ , а сила  $F$  подобна напряжению  $U$ .

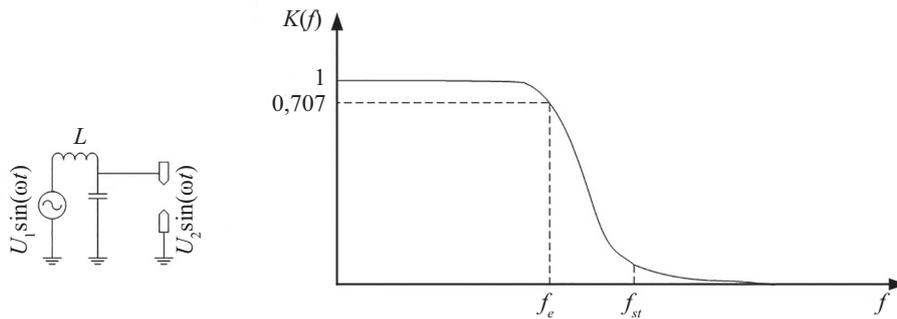


Рис. 2. Поясняющий рисунок к описанному методу электромеханических аналогий: LC-фильтр нижних частот ( $K(f)$  — отклик фильтра от частоты воздействия,  $t$  — время)

При помощи такой аналогии [51] становится возможным определить зависимость подавления  $S$  (дБ) входного напряжения  $U_1$  (В) и отношение  $f_{st}/f_e$ , где  $f_{st}$  — начальная частота желаемого диапазона шумоподавления (Гц) [51]:

$$S = 20 \lg \left( \frac{U_1}{U_2} \right),$$

$$I = \frac{U_1}{\omega L + 1/\omega C},$$

где  $\omega$  — круговая частота сигнала, рад/с;  $I$  — ток через фильтр, А.

$$U_2 = \frac{U_1}{\omega^2 LC + 1}.$$

Решая данные уравнения для желаемого  $S$  (в дБ), возможно найти оптимальное произведение  $LC$ , или отношение  $F_H/a_x k$  в случае механической системы, а также ее собственную частоту. Выбором коэффициента жесткости эластичного элемента  $k$  осуществляется сдвиг собственной частоты  $f_e$  в область нижних частот таким образом, чтобы она была в раз меньше частоты  $f_{st}$ . В таблице указано соотношение уровней подавления  $S$  и отношения  $f_{st}/f_e$ , рассчитанное по указанной методике. При изменении требований условий корректировка требуемого коэффициента жесткости может быть произведена путем параллельного или последовательного включения эластичных элементов с одинаковыми, либо отличающимися коэффициентами жесткости с соблюдением соответствующих правил нахождения результирующего значения  $k$  (рис. 3).

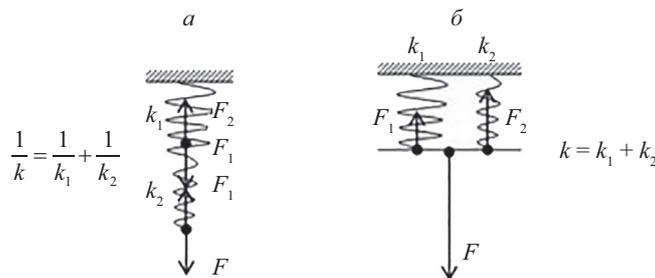


Рис. 3. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение эластичных элементов

Таблица. Соотношение уровней подавления и соотношения частот, рассчитанные по предложенной методике

Подавление $S$ , дБ	5	7,5	10	15	20	25	30	35
Соотношение частот $f_{st}/f_e$	1,65	1,8	2	2,6	3,3	4,2	5,4	7

Таким образом, становится возможным вычислить требуемый коэффициент жесткости эластичной секции  $k_{ov}$  для виброзащиты конкретной системы [49]:

$$k_{ov} = \frac{4\pi^2 f_e^2 F_H}{a_x},$$

Таким образом, для расчета важнейшего параметра эластичной секции – ее коэффициента жесткости (Н/м) необходимо провести измерение уровня натяжения буксируемого тела в процессе буксировки, а также ее зависимость от скорости буксировки.

При этом для большинства представленных на рынке эластичных изделий (шнуры, веревки, тросы и др.) в характеристиках указывается так называемое относительное удлинение при заданной нагрузке [52]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L},$$

где  $L$  — исходная длина, м,  $\Delta l$  — абсолютное удлинение при определенной нагрузке, м.

Переход от относительного удлинения к коэффициенту жесткости изделия осуществляется при помощи закона Гука:

$$F = -k\Delta l.$$

Таким образом, эти величины могут быть связаны следующим образом:

$$k = \frac{F_H}{\varepsilon L}.$$

Связь коэффициента жесткости эластичной секции со свойствами материала и его геометрическими параметрами может быть выражена следующим образом:

$$k = \frac{ES}{L}.$$

где  $E$  — модуль Юнга материала секции, Н/м<sup>2</sup> (Па);  $S$  — площадь поперечного сечения секции, м<sup>2</sup>,  $L$  — длина секции, м.

Как правило, измерение уровня натяжения буксируемого тела происходит при помощи включаемого в разрыв навесного оборудования, имеющего в своем составе металлорезистивный тензометрический датчик и систему его опроса. Однако более перспективным путем является внедрение в сейсмическую косу распределенной волоконно-оптической тензометрической системы. Такая система может быть реализована на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Принцип действия такой системы основан на регистрации изменения спектральных свойств ВБР (центральной длины волны пика отражения) в зависимости от внешнего воздействия. Наличие данной тензометрической системы, кроме единичного расчета параметров виброразвязывающих конструкций, может быть полезно при *in situ* мониторинге параметров косы в процессе буксировки и корректировки количества и параметров эластичных секций, введенных в действие, при изменении условий проведения сейсморазведки. Такая распределенная волоконно-оптическая тензометрическая система обладает рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с классическим подходом: полная нечувствительность к внешним электромагнитным полям и волнам обеспечивает чрезвычайно высокую помехозащищенность, более широкий частотный диапазон работы, определяемый частотой опроса ВБР, возможность квазираспределенного мониторинга уровня натяжения буксируемой косы и его неравномерности по всей ее длине, а также безразрывное построение буксируемого тела при разработке соответствующей оснастки для закрепления датчика. Применение данной системы позволит улучшить контроль качества (quality of service, QoS) и достоверности получаемых сейсмоданных, что является чрезвычайно важным при проведении геологоразведочных мероприятий.

Главным элементом квазираспределенной волоконно-оптической тензометрической системы является ВБР, представляющая собой участок оптического волокна (ОВ), в сердцевине которого показатель преломления (ПП) периодически изменяется в продольном направлении (рис. 4). Основные параметры волоконной решетки Брэгга связаны следующим выражением [53, 54]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1}$$

где  $\lambda_B$  — длина волны брэгговского резонанса (главного максимума отражения ВБР), м;  $n_{eff}$  — эффективный ПП основной моды сердцевины ОВ для центральной длины волны отражения решетки;  $\Lambda$  — период ВБР, м.

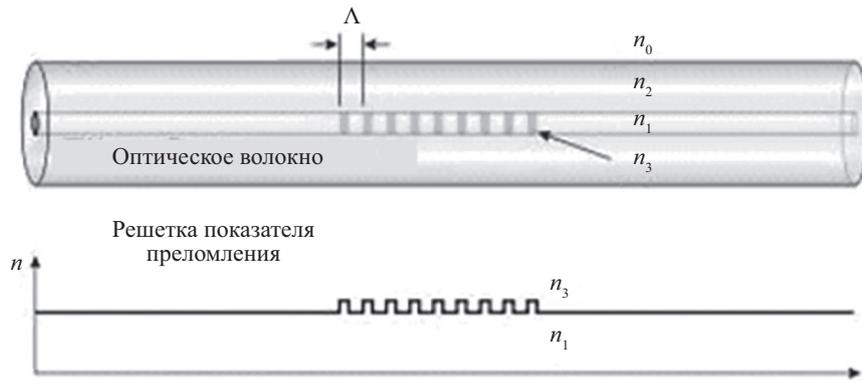


Рис. 4. Волоконная брэгговская решетка с показателями преломления:  $n_0$  — окружающей среды,  $n_1$  — сердцевины оптического волокна,  $n_2$  — оболочки оптического волокна,  $n_3$  — наведенном при записи волоконной брэгговской решетки

Волоконные решетки Брэгга восприимчивы к температурным изменениям окружающей среды, поэтому в средах с различными температурными значениями сдвиг длины волны ВБР будет подвержен паразитному влиянию температуры. Следовательно, выделение температурного влияния на результирующий сигнал необходимо для правильного мониторинга состояния исследуемого объекта.

Наиболее простой способ выделения механического воздействия на отраженный сигнал ВБР от температурного описан в работе [55]. В ней рассматривается построение сенсорной системы, в качестве чувствительных элементов которой лежит телекоммуникационное ОВ с записанными в него двумя ВБР на разных длинах волн. При таком подходе одна решетка (ВБР-1, рис. 5, а), изолированная от деформации, испытывает только изменения температуры, а вторая (ВБР-2, рис. 5, б) взаимодействует как с деформацией, так и с температурой. Другой подход заключается в использовании суперпозиции ВБР [56] пары ВБР, записанной в ОВ с различными легирующими примесями [57], либо в ОВ различного диаметра [58]. Однако механическую прочность чувствительных элементов таких датчиков снижает сварной стык в месте соединения двух волокон.

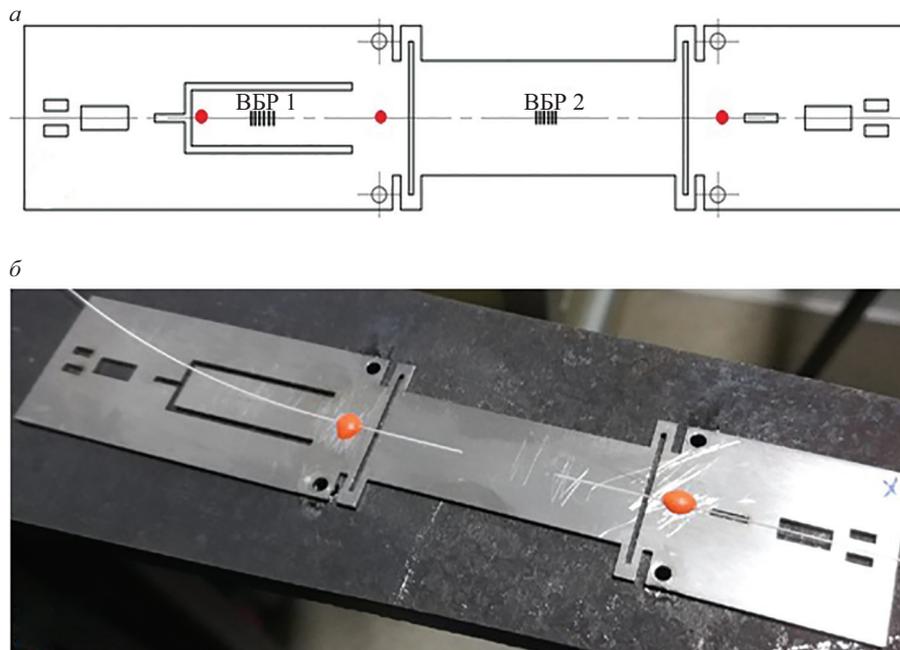


Рис. 5. Схема расположения оптического волокна с двумя записанными в него волоконными брэгговскими решетками на специальной оснастке (красными точками отмечены места предполагаемого закрепления оптического волокна в оснастке) (а); тензометрический датчик на основе волоконной брэгговской решетки, размещенный в специальной оснастке на балке равного сопротивления изгибу (б)

Выражение (1) подразумевает, что на длину отраженной волны  $\lambda_B$  оказывает влияние любая вариация параметров решетки. Например, деформация ОВ приводит к изменению периода решетки, а также вследствие эффекта фотоупругости влечет за собой изменение эффективного ПП основной моды сердцевины ОВ. Аналогично, изменение температуры влечет за собой изменение периода решетки вследствие термического

расширения материала световода, а также — эффективного ПП основной моды сердцевинны ОВ вследствие термооптического эффекта. Смещение центральной длины волны отражения под действием деформации и температуры можно записать так:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda_B$  — сдвиг брэгговской длины волны, м;  $\partial n_{eff}$  — изменение эффективного ПП;  $\partial \Lambda$  — изменение периода брэгговской решетки;  $\partial T$  и  $\partial l$  — приращение по температуре и по длине;  $\Delta l$  — абсолютное удлинение ОВ, м;  $\Delta T$  — изменение температуры, °С.

Первое слагаемое в выражении (2) показывает механическое воздействие на ВБР [57]. Этот фрагментарный вклад в сдвиг резонансной длины волны можно описать следующим образом:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B K_\epsilon \epsilon, \quad (3)$$

где  $K_\epsilon$  — коэффициент тензочувствительности (около 0,774 для стандартного одномодового ОВ);  $\epsilon = \Delta l / l$  — относительное удлинение ОВ;  $l$  — исходная длина ОВ, м.

Второе слагаемое в выражении (2) показывает температурное воздействие на ВБР. Подобное смещение  $\lambda_B$  при изменении температуры  $\Delta T$  может быть записано как:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B K_T \Delta T, \quad (4)$$

где  $K_T$  — коэффициент термочувствительности (около  $9,15 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  для стандартного одномодового ОВ).

Поскольку изменение резонансной длины волны решетки (формулы (3) и (4)) зависит от самого значения  $\lambda_B$ , то ее смещение у ВБР, записанных на разных длинах волн, будет отличаться, несмотря на то что к решеткам Брэгга может прикладываться одно и то же механическое напряжение или температура. Так, например, решетка Брэгга, записанная на длине волны 1550 нм в стандартном ОВ, имеет сдвиг длины волны, равный 1,2 пм при относительном удлинении  $\epsilon = 10^{-6}$ , и 13,7 пм при изменении температуры на 1 °С. Для ВБР на длине волны 1310 нм при тех же условиях чувствительность к растяжению и температуре составляет приблизительно 1 пм/(мкм/м) и 11,6 пм/°С соответственно.

Также важно, что два члена уравнения (2) независимы. Это значит, что ВБР можно использовать для измерения температуры, изолировав ОВ от растяжения. Следовательно, зная температуру, можно проводить термокомпенсированные измерения растяжения, за это обычно отвечает вторая изолированная решетка Брэгга. Кроме того, измерение температуры позволит производить корректировку получаемых сейсмоданных с учетом зависимости скорости звука от температуры среды буksировки, что также положительно скажется на качестве получаемого результата. Помимо температуры и растяжения, ВБР является перспективным элементом для измерения других физических величин, таких как давление, ускорение, смещение и т.п. [59, 60].

Авторами данной статьи проводится разработка собственного тензометрического датчика, ВБР для которого изготавливаются при помощи использования схемы записи в интерферометре Тальбота [61]. На данном этапе разработки внедряются способы и методики крепления чувствительной части волоконного тензометрического датчика. В рамках данной работы были проведены испытания прототипа тензометрического датчика, закрепленного на балке равного сопротивления изгибу (рис. 5, б), и были достигнуты следующие результаты, представленные на рис. 6. При относительном удлинении балки в диапазоне до 1030 мкм/м была достигнута средняя чувствительность 0,68 пм/(мкм/м), разброс значений составил +/- 1пм. Стоит отметить, что работа самих ВБР носит практически безинерционный характер, время срабатывания и динамический диапазон по амплитуде воздействия датчика в большей степени определяется свойствами металлических балок и оснастки, в которых фиксируются оптические волокна.

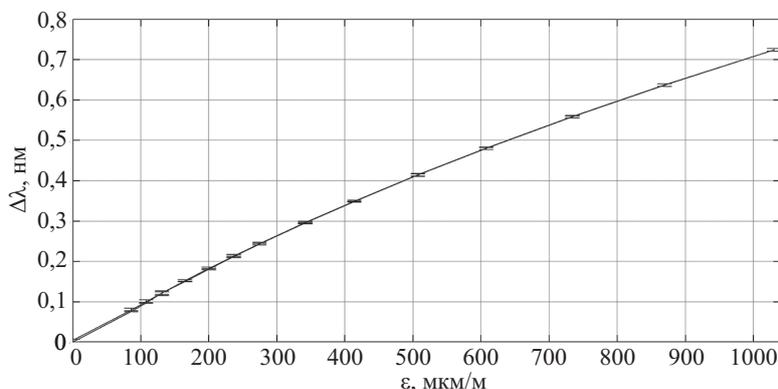


Рис. 6. Экспериментально полученный график зависимости сдвига центральной длины волны от величины удлинения. Синяя — нагрузка, желтая — разгрузка

## Заключение

В ходе работы над данной статьей авторами рассмотрены основные шумовые воздействия, действующие на сейсмические косы во время их буксировки, а также основные технические решения для снижения их воздействия. Кроме того, предложена методика расчетов параметров эластичных виброразвязывающих секций на основе показаний тензометрических датчиков.

Рассмотренный в рамках данной статьи материал отражает перспективность применения распределенных тензометрических волоконно-оптических систем непосредственно в составе конструкции волоконно-оптических буксируемых сейсмических кос. Также стоит отметить, что основные элементы тензометрической системы могут быть реализованы на базе телекоммуникационных оптических волокон SMF-28 стандарта G.657, что позволяет встраивать такие распределенные системы без внесения существенных потерь мощности оптического сигнала на сварных соединениях [62]. Приведены экспериментальные данные исследования прототипа такой системы.

В продолжение работы по созданию распределенной тензометрической системы планируется разработка конструкции оснастки тензометрического датчика для его использования непосредственно в составе конструкции буксируемых сейсмических кос. В текущем исполнении данная система работает с частотой дискретизации 5 кГц, что позволяет осуществлять контроль качества (quality of service, QoS) регистрируемых сейсмоданных путем оценки различных видов шумовых воздействий в полосе частот 0–2500 Гц. Такой контроль положительным образом скажется на качестве проводимых сейсмических геологоразведочных работ за счет возможности частичной компенсации шумовых механических воздействий при обработке сигналов.

### Литература

1. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Освоение месторождений нефти и газа в морях Арктики и других акваториях России // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18 № 3. С. 377–385.
2. Лаверов Н.П., Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2. С. 4–13.
3. Гурвич И.И. Сейсморазведка. М.: Госгеолтехиздат, 1954. 354 с.
4. Pallayil V. Ceramic and fibre optic hydrophone as sensors for lightweight arrays—A comparative study // Proc. OCEANS 2017-Anchorage. Anchorage, USA, 2017. P. 1–13.
5. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V. et al. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors // IEEE Sensors Journal. 2018. V. 18. N 5. P. 1985–1992. doi: 10.1109/jsen.2018.2792540
6. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // Advances in Optical Technologies. 2014. V. 2014. Art. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
7. Plotnikov M.Y. et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications // IEEE Sensors Journal. 2019. V. 19. N 9. P. 3376–3382.
8. Beverini N., Falciai R., Maccioni E. et al. Developing fiber lasers with Bragg reflectors as deep sea hydrophones // Annals of Geophysics. 2006. V. 49. N 6. doi: 10.4401/ag-3097
9. Beverini N., Firpi S., Guerrini P. et al. Fiber laser hydrophone for underwater acoustic surveillance and marine mammals monitoring // LAT 2010: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies. 2011. V. 7994. doi: 10.1117/12.880973
10. Launay F.X. et al. Acoustic antenna based on fiber laser hydrophones // Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Optical Fibre Sensors. 2014. V. 9157. doi: 10.1117/12.963039
11. Azmi A.I., Leung I., Chen X. et al. Fiber laser based hydrophone systems // Photonic Sensors. 2011. V. 1. N 3. P. 210–221. doi: 10.1007/s13320-011-0018-3
12. Hill D.J. et al. Fiber laser hydrophone array // Proceedings SPIE. 1999. V. 3860. P. 55–67. doi: 10.1117/12.372963
13. Bagnoli P.E. et al. Development of an erbium-doped fibre laser as a deep-sea hydrophone // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2006. V. 8. N 7. P. S535–S539. doi: 10.1088/1464-4258/8/7/s36
14. Foster S. et al. A fibre laser sensor seabed array // Proc. Acoustics. 2013. V. 7004.

### References

1. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Development of oil and gas fields in the Arctic seas and other Russian offshore areas. *Vestnik of MSTU*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 377–385. (in Russian)
2. Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges. *The Arctic: Ecology and Economy*, 2016, no. 2, pp. 4–13. (in Russian)
3. Gurvich I.I. *Seismic Survey*. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1954, 354 p. (in Russian)
4. Pallayil V. Ceramic and fibre optic hydrophone as sensors for lightweight arrays—A comparative study. *Proc. OCEANS 2017-Anchorage*. Anchorage, USA, 2017, pp. 1–13.
5. Nikitenko A.N., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V. et al. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1985–1992. doi: 10.1109/jsen.2018.2792540
6. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, vol. 2014, art. 815108. doi: 10.1155/2014/815108
7. Plotnikov M.Y. et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications. *IEEE Sensors Journal*, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 3376–3382.
8. Beverini N., Falciai R., Maccioni E. et al. Developing fiber lasers with Bragg reflectors as deep sea hydrophones. *Annals of Geophysics*, 2006, vol. 49, no. 6. doi: 10.4401/ag-3097
9. Beverini N., Firpi S., Guerrini P. et al. Fiber laser hydrophone for underwater acoustic surveillance and marine mammals monitoring. *LAT 2010: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies*, 2011, vol. 7994. doi: 10.1117/12.880973
10. Launay F.X. et al. Acoustic antenna based on fiber laser hydrophones. *Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Optical Fibre Sensors*, 2014, vol. 9157. doi: 10.1117/12.963039
11. Azmi A.I., Leung I., Chen X. et al. Fiber laser based hydrophone systems. *Photonic Sensors*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 210–221. doi: 10.1007/s13320-011-0018-3
12. Hill D.J. et al. Fiber laser hydrophone array. *Proceedings SPIE*, 1999, vol. 3860, pp. 55–67. doi: 10.1117/12.372963
13. Bagnoli P.E. et al. Development of an erbium-doped fibre laser as a deep-sea hydrophone. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, vol. 8, no. 7, pp. S535–S539. doi: 10.1088/1464-4258/8/7/s36

15. Foster S., Tikhomirov A., Van Velzen J., Harrison J. Recent advances in fibre optic array technologies // Proc. Australian Acoustical Society Conference. 2012. P. 678–683.
16. Andrews Jr.D.E. Vibration Isolation Module for Towed Seismic Arrays. Patent US 5062085. 1991.
17. Florence N.K. Aquatic Tow Rope with Shock Absorber. Patent US 3094096. 1963.
18. Fitzpatrick H.M., Neville J.J., Thompson J., Boggs F.W. Vibration Isolation Module for Towed Cables. Patent US 3648226. 1972.
19. Appling J. Vibration Isolation Module. Patent US 4628851A. 1986.
20. Reynier R., Malcor J.G., Moresco G., Ramoger F. Vibration Damper for a Towed Body. Patent US 4762208. 1988.
21. McGavern S.A. Cable Vibration Damper. Patent US 2969416. 1961.
22. Miller H.A., Nichols C.S. Acoustic Envelope having Minimal Vibration and Flow Induced Noises. Patent US 4402069. 1983.
23. Гринченко В.Т., Макаренков А.П., Воскобойник В.А. Гидродинамические шумы вертикальной дрейфующей антенны и средства их снижения // Гидроакустический журнал. 2006. № 3. С. 17–24.
24. Макаренков А.П., Воскобойник В.А. Гидродинамические шумы гибкой протяженной буксируемой антенны // Акустический симпозиум «Консонанс-2003». С. 78–83.
25. Кудашев Е.Б., Кенигсбергер Г.В. Экспериментальные исследования турбулентных пульсаций давления в условиях глубокого моря // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2012. Т. 154. № 3. С. 82–90.
26. Закревский В.А., Пахотин В.А. Влияние механоиндуцированных ионизационных процессов в полимерных диэлектриках на шумы кабельных датчиков физических полей // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 1. С. 62–68. doi: 10.7868/S0033849412100129
27. Гринченко В.Т., Макаренков А.П., Воскобойник В.А. Снижение гидродинамических шумов растворами высокомолекулярных полимеров // Акустичний вісник. 2007. Т. 10. № 2. С. 33–42.
28. Баженова Л.А., Семенов А.Г. О природе вихревого звука при обтекании потоком цилиндра // Ученые записки физического факультета МГУ. 2014. № 6. С. 146305.
29. Макаренков А.П., Воскобойник В.А. Снижение гидродинамических помех антенн с векторными приемниками // Акустический симпозиум «Консонанс-2007». Киев, 2007. С. 169–175.
30. Макаренков А.П., Воскобойник В.А., Смоляр В.В. Взаимные характеристики пульсаций псевдозвукового давления на поверхности продольно обтекаемого цилиндра // Акустичний симпозиум «Консонанс-2015». Киев, 2015. С. 52–58.
31. Van Der Wal A. Systems and Methods of a Marine Geophysical Damper System. Patent US 20180052244 A1. 2017.
32. Hocker G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature // Applied Optics. 1979. V. 18. N 9. P. 1445–1448. doi: 10.1364/ao.18.001445
33. McMahon G.W., Cielo P.G. Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations // Applied Optics. 1979. V. 18. N 22. P. 3720–3722. doi: 10.1364/ao.18.003720
34. Lagakos N., Bush I.J., Cole J.H., Bucaro J.A., Skogen J.D., Hocker G.B. Acoustic desensitization of single-mode fibers utilizing nickel coatings // Optics Letters. 1982. V. 7. N 9. P. 460. doi: 10.1364/ol.7.000460
35. Hocker G.B. Fiber-optic acoustic sensors with increased sensitivity by use of composite structures // Optics Letters. 1979. V. 4. N 10. P. 320. doi: 10.1364/ol.4.000320
36. Lagakos N., Bucaro J.A. Pressure desensitization of optical fibers // Applied Optics. 1981. V. 20. N 15. P. 2716. doi: 10.1364/ao.20.002716
37. Yang Y.-C., Lee H.-L., Chou H.-M. Elasto-optics in double-coated optical fibers induced by axial strain and hydrostatic pressure // Applied Optics. 2002. V. 41. N 10. P. 1989. doi: 10.1364/ao.41.001989
38. Lagakos N., Hickman T.R., Cole J.H., Bucaro I.A. Optical fibers with reduced pressure sensitivity // Optics Letters. 1981. V. 6. N 9. P. 443. doi: 10.1364/ol.6.000443
39. Lagakos N. et al. Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1982. V. 30. N 4. P. 529–535. doi: 10.1109/tmtt.1982.1131094
40. Foster S. et al. A fibre laser sensor seabed array. Proc. Acoustics, 2013, vol. 7004.
41. Foster S., Tikhomirov A., Van Velzen J., Harrison J. Recent advances in fibre optic array technologies. Proc. Australian Acoustical Society Conference, 2012, pp. 678–683.
42. Andrews Jr.D.E. Vibration Isolation Module for Towed Seismic Arrays. Patent US 5062085, 1991.
43. Florence N.K. Aquatic Tow Rope with Shock Absorber. Patent US 3094096, 1963.
44. Fitzpatrick H.M., Neville J.J., Thompson J., Boggs F.W. Vibration Isolation Module for Towed Cables. Patent US 3648226, 1972.
45. Appling J. Vibration Isolation Module. Patent US 4628851 A, 1986.
46. Reynier R., Malcor J.G., Moresco G., Ramoger F. Vibration Damper for a Towed Body. Patent US 4762208, 1988.
47. McGavern S.A. Cable Vibration Damper. Patent US 2969416, 1961.
48. Miller H.A., Nichols C.S. Acoustic Envelope having Minimal Vibration and Flow Induced Noises. Patent US 4402069, 1983.
49. Grinchenko V.T., Makarenkov A.P., Voskoboinik V.A. Hydrodynamic noise of a vertical drift antenna and means of their reduction. Hydroacoustic Journal, 2006, no. 3, pp. 17–24. (in Russian)
50. Makarenkov A.P., Voskoboinik V.A. Hydrodynamic noises of a flexible extended towed antenna. Akusticheskiy Simpozium KONSONANS. Kiev, Ukraine, 2003, pp. 78–83. (in Russian)
51. Kudashev E.B., Kenigsberger G.V. Experimental studies of turbulent pressure fluctuations in the Deep Sea. Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series, 2012, vol. 154, no. 3, pp. 82–90. (in Russian)
52. Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A. Effect of mechanically induced ionization processes in polymer insulators on the noise of cable sensors of physical fields. Journal of Communications Technology and Electronics, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 56–61. doi: 10.1134/S1064226912100117 (in Russian)
53. Grinchenko V.T., Makarenkov A.P., Voskoboinik V.A. Reduction of hydrodynamic noise by solutions of high-molecular polymers. Akusticheskii Vestnik, 2007, vol. 10, no. 2, pp. 33–42. (in Russian)
54. Bazhenova L.A., Semenov A.G. On nature of vortex sound generated by streamlined cylinder. Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 2014, no. 6, p. 146305 (in Russian)
55. Makarenkov A.P., Voskoboinik V.A.. Reducing the hydrodynamic interference of antennas with vector receivers. Akusticheskiy Simpozium KONSONANS-2007. Kiev, Ukraine, 2007, pp. 169–175. (in Russian)
56. Makarenkov A.P., Voskoboinik V.A., Smolyar V.V. Reciprocal characteristics of pseudo-sound pressure pulsations on the surface of a longitudinally streamlined cylinder. Akusticheskiy Simpozium KONSONANS-2015. Kiev, Ukraine, 2015, pp. 52–58. (in Russian)
57. Van Der Wal A. Systems and Methods of a Marine Geophysical Damper System. Patent US 20180052244 A1, 2017.
58. Hocker G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. Applied Optics, 1979, vol. 18, no. 9, pp. 1445–1448. doi: 10.1364/ao.18.001445
59. McMahon G.W., Cielo P.G. Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations. Applied Optics, 1979, vol. 18, no. 22, pp. 3720–3722. doi: 10.1364/ao.18.003720
60. Lagakos N., Bush I.J., Cole J.H., Bucaro J.A., Skogen J.D., Hocker G.B. Acoustic desensitization of single-mode fibers utilizing nickel coatings. Optics Letters, 1982, vol. 7, no. 9, pp. 460. doi: 10.1364/ol.7.000460
61. Hocker G.B. Fiber-optic acoustic sensors with increased sensitivity by use of composite structures. Optics Letters, 1979, vol. 4, no. 10, pp. 320. doi: 10.1364/ol.4.000320
62. Lagakos N., Bucaro J.A. Pressure desensitization of optical fibers. Applied Optics, 1981, vol. 20, no. 15, pp. 2716. doi: 10.1364/ao.20.002716
63. Yang Y.-C., Lee H.-L., Chou H.-M. Elasto-optics in double-coated optical fibers induced by axial strain and hydrostatic pressure. Applied Optics, 2002, vol. 41, no. 10, pp. 1989. doi: 10.1364/ao.41.001989
64. Lagakos N., Hickman T.R., Cole J.H., Bucaro I.A. Optical fibers with reduced pressure sensitivity. Optics Letters, 1981, vol. 6, no. 9, p. 443. doi: 10.1364/ol.6.000443

40. Okano M., Kajimura K., Wakiyama S., Sakai F., Mizutani W., Ono M. Vibration isolation for scanning tunneling microscopy // *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1987. V. 5. N 6. P. 3313–3320. doi: 10.1116/1.574189
41. Власов А.А., Алейник А.С., Плотников М.Ю., Аширов А.Н., Моторин Е.А. Исследование способов повышения точностных характеристик волоконно-оптической сейсмической косы // *Наука и инновации в технических университетах*. СПб., 2018. С. 8–9.
42. Власов А.А., Алейник А.С., Моторин Е.А., Плотников М.Ю., Волковский С.А. Способы защиты чувствительных волоконно-оптических узлов от внешних шумов и вибраций // *Наука и инновации в технических университетах*. СПб., 2017. С. 7–8.
43. Власов А.А., Аширов А.Н., Алейник А.С. Методы защиты волоконно-оптических интерферометров от воздействия акустических шумов окружающей среды // *Труды VII Всероссийской научно-практической конференции «Защита от повышенного шума и вибрации»*. 2019.
44. Власов А.А., Алейник А.С., Аширов А.Н., Плотников М.Ю., Варламов А.В. Волоконно-оптические кабели с высокой акустической изоляцией // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. № 15. С. 29.
45. Willems M. Active Damper System. Patent US 9545831. 2017.
46. Badenoch S.W., Shal D., Fratini A.V., Connair K.M.Jr., Hamilton H.D. Vehicle Suspension Control with Compensation for Yaw Correcting Active Brake Control. Patent WO2000059747A1. 2000.
47. Tamba R.T. Active Damping System. Patent WO2013120142A1. 2013.
48. Cao Q., Jin L., Liang Y., Cheng L., Guan B.-O. Compact dual-frequency fiber laser accelerometer with sub- $\mu\text{g}$  resolution // *Photonic Sensors*. 2016. V. 6. N 2. P. 115–120. doi: 10.1007/s13320-016-0315-y
49. Budynas R.G. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2014. 1104 p.
50. Brillouin L. *Wave Propagation in Periodic Structures*. 2<sup>nd</sup> ed. Dover Phoenix Editions, 1946. 255 p.
51. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters*. Kluwer, 2003. 453 p.
52. Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. 10-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
53. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego: Academic Press, 1999. 459 p.
54. Варжель С.В. *Волоконные брэгговские решетки*. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
55. Nellen M., Mauron P., Frank A., Sennhauser U., Bohnert K., Pequignot P., Bodor P., Brändle H. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003. V. 103. N 3. P. 364–376. doi: 10.1016/s0924-4247(02)00430-2
56. Коннов К.А., Сложеникина Ю.И., Грибаев А.И., Варжель С.В., Новикова В.А., Залеская Ю.К., Дмитриев А.А. Исследование и оптимизация процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 6. С. 1004–1010.
57. Yoon H.J., Costantini D.M., Limberger H.G., Salathe R.P., Kim C.-G., Michaud V. In situ strain and temperature monitoring of adaptive composite materials // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2006. V. 17. P. 1059–1067. doi: 10.1177/1045389x06064889
58. James S.W., Dockney M.L., Tatam R.P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors // *Electronics Letters*. 1996. V. 32. N 12. P. 1133–1134.
59. Новикова В.А., Варжель С.В., Дмитриев А.А., Залеская Ю.К., Идрисов Р.Ф. Исследование спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом при воздействии давления, направленного перпендикулярно оси оптического волокна // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 5. С. 751–757. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757
60. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // *Sensors*. 2012. V. 12. N 2. P. 1898–1918. doi: 10.3390/s120201898
39. Lagakos N. et al. Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, vol. 30, no. 4, pp. 529–535. doi: 10.1109/tmmt.1982.1131094
40. Okano M., Kajimura K., Wakiyama S., Sakai F., Mizutani W., Ono M. Vibration isolation for scanning tunneling microscopy. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1987, vol. 5, no. 6, pp. 3313–3320. doi: 10.1116/1.574189
41. Vlasov A.A., Aleinik A.S., Plotnikov M.Yu., Ashirov A.N., Motorin E.A. Study of ways to improve the accuracy characteristics of fiber optic seismic streamer. *Proc. Science and Innovations at Technical Universities*. St. Petersburg, 2018, pp. 8–9. (in Russian)
42. Vlasov A.A., Aleinik A.S., Motorin E.A., Plotnikov M.Yu., Volkovskii S.A. Ways to protect sensitive fiber-optic nodes from external noise and vibrations. *Science and Innovations at Technical Universities*. St. Petersburg, 2017, pp. 7–8. (in Russian)
43. Vlasov A.A., Ashirov A.N., Aleinik A.S. Methods of fiber-optic interferometers protection from the effects of acoustic noise of the environment. *Proc. 7<sup>th</sup> All-Russian Conf. on Noise and Vibration Protection*, 2019.
44. Vlasov A.A., Aleinik A.S., Ashirov A.N., Plotnikov M.Yu., Varlamov A.V. Fiber-optic cables with high acoustic insulation. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 15, pp. 29. (in Russian)
45. Willems M. Active Damper System. Patent US 9545831, 2017.
46. Badenoch S.W., Shal D., Fratini A.V., Connair K.M.Jr., Hamilton H.D. Vehicle Suspension Control with Compensation for Yaw Correcting Active Brake Control. Patent WO2000059747A1, 2000.
47. Tamba R.T. Active Damping System. Patent WO2013120142A1, 2013.
48. Cao Q., Jin L., Liang Y., CHENG L., GUAN B.-O. Compact dual-frequency fiber laser accelerometer with sub- $\mu\text{g}$  resolution. *Photonic Sensors*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 115–120. doi: 10.1007/s13320-016-0315-y
49. Budynas R.G. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2014, 1104 p.
50. Brillouin L. *Wave Propagation in Periodic Structures*. 2<sup>nd</sup> ed. Dover Phoenix Editions, 1946, 255 p.
51. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters*. Kluwer, 2003, 453 p.
52. Feodos'ev V.I. *Strength of Materials*. 10<sup>th</sup> ed. Moscow, MSTU named by Bauman, 1999, 592 p. (in Russian)
53. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, Academic Press, 1999, 459 p.
54. Varzhel S.V. *Fiber Bragg Gratings*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2015, 65 p. (in Russian)
55. Nellen M., Mauron P., Frank A., Sennhauser U., Bohnert K., Pequignot P., Bodor P., Brändle H. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 103, no. 3, pp. 364–376. doi: 10.1016/s0924-4247(02)00430-2
56. Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Novikova V.A., Zalesskaya Yu.K., Dmitriev A.A. Inscription process research and optimization for superimposed fiber Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1004–1010 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010
57. Yoon H.J., Costantini D.M., Limberger H.G., Salathe R.P., Kim C.-G., Michaud V. In situ strain and temperature monitoring of adaptive composite materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, vol. 17, pp. 1059–1067. doi: 10.1177/1045389x06064889
58. James S.W., Dockney M.L., Tatam R.P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors. *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no. 12, pp. 1133–1134.
59. Novikova V.A., Varzhel S.V., Dmitriev A.A., Zalesskaya Yu.K., Idrisov R.F. Spectral characteristics study of phase-shifted fiber Bragg gratings under pressure applied perpendicular to fiber axis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 751–757 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757
60. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1898–1918. doi: 10.3390/s120201898

61. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
62. Варламов А.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е., Варжель С.В., Аксарин С.М. Определение оптических потерь при стыковке световодов с различным диаметром модового поля // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 2 (84). С. 23–26.
61. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
62. Varlamov A.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Varzhel' S.V., Aksarin S.M. Determination of optical losses at fiber joining with different modefield diameter. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 2, pp. 23–26. (in Russian)

#### Авторы

**Власов Александр Андреевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8839-6721, salusnetklim@yandex.ru

**Алейник Артём Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, yartemal@yandex.ru

**Плотников Михаил Юрьевич** — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

**Дмитриев Андрей Анатольевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, Dmitrievaa1994@yandex.ru

**Варжель Сергей Владимирович** — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru

#### Authors

**Alexander A. Vlasov** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8839-6721, salusnetklim@yandex.ru

**Artem S. Aleinik** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, yartemal@yandex.ru

**Mikhail Yu. Plotnikov** — PhD, Scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57193069973, ORCID ID: 0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

**Andrey A. Dmitriev** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, Dmitrievaa1994@yandex.ru

**Sergey V. Varzhel** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru