



# Оптимизация конструкции экспериментального отражательного элемента для амплитудного волоконно-оптического датчика вибрации отражательного типа

О. В. Бурдышева<sup>1</sup>, Е. С. Шолгин<sup>1</sup>, А. Ю. Максимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория агробиопhotоники, Пермский ФИЦ УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермский ФИЦ УрО РАН, г. Пермь, Россия

Работа посвящена разработке конструкции отражательного элемента для амплитудного волоконно-оптического датчика вибрации, а также тестированию работоспособности такой конструкции. В работе описана математическая модель поперечных колебаний, помогающая определить частоты резонанса в зависимости от длины свободного волокна. Реализована отражающая поверхность, представляющая собой периодическую структуру ниобата лития и участков, покрытых золотом. Представлена компоновка и конструкция датчика вибрации с возможностью перестройки частоты резонанса, а также продемонстрирована экспериментальная схема. Сигнал, полученный при помощи описанной схемы, поддается обработке преобразования Фурье, рассчитанные частоты совпадают с частотами колебаний источника вибраций. Получена амплитудно-частотная характеристика, частота резонанса коррелирует с частотами, полученными математической моделью (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,977). Результаты

# Optimization of the Design of an Experimental Reflective Element for an Amplitude Fiber-Optic Vibration Sensor of a Reflective Type

O. V. Burdysheva<sup>1</sup>, E. S. Sholgin<sup>1</sup>, A. Yu. Maksimov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of Agrobiophotonics, Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

<sup>2</sup> Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

This work is devoted to the development of a design of a reflective element for an amplitude fiber-optic vibration sensor, as well as testing the performance of such a design. In the presented work, a mathematical model of transverse vibrations is described, which helps to determine the resonance frequencies depending on the length of the free fiber. A reflective surface is implemented, which is a periodic structure of lithium niobate and areas covered with gold. The layout and design of a vibration sensor with the ability to tune the resonance frequency is presented, and an experimental circuit is demonstrated. The signal obtained using the described circuit lends itself to Fourier transform processing, the calculated frequencies coincide with the vibration frequencies of the vibration source. The amplitude-frequency characteristic is obtained, the resonance frequency correlates with the frequencies obtained by the mathematical model (Pearson's correlation coefficient is 0.977). The results of the implementation of this development are important for a new interdisciplinary direction – agrobiophotonics, provide a key to a more subtle and accurate study of animal vibration sensitivity and plant vibrotropism.



**реализации настоящей разработки важны для нового междисциплинарного направления – агробиофотоники, дают ключ к более тонкому и точному изучению виброчувствительности животных и вибротропизма растений.**

**Ключевые слова:** датчик, волоконно-оптический датчик, амплитудный датчик отражательного типа, датчик вибрации, вибрация, вибромониторинг

Статья получена: 17.04.2021  
Принята к публикации: 10.05.2021

## ВВЕДЕНИЕ

Потребность технических устройств в датчиках стремительно растет в связи с развитием информационно-измерительных систем, автоматизированных систем контроля и управления производством. Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать такими свойствами, как малый вес, небольшие габариты, малая потребляемая мощность, совместимость с микроэлектронными устройствами обработки информации. Этим требованиям в максимальной степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОД) [1,2].

ВОД зачастую выполняются из материалов, являющихся диэлектриками, что исключает риск возникновения искры и как следствие возгорания, само же волокно устойчиво к коррозии и радиации. Также производство ВОД характеризуется хорошими показателями производительности и низкой стоимостью. ВОД могут находиться на большом расстоянии от контролируемого объекта, возможно последовательное соединение множества чувствительных элементов в одну линию, существуют также распределенные волоконно-оптические датчики [1, 3-5]. Особенно интересно их использование в такой новой междисциплинарной области, как мониторинг акустических полей флоры и фауны различных природных локаций (в области физиологии и регуляции роста растений, зоологии, агробиофотоники, аквакультуры, продуктивности молочного животноводства и т. д.).

Так, известно, что растения чувствительны к вибрации воды, почвы, насекомых – опылителей насекомых, поедающих растения, и реагируют на эти воздействия движением – тропизмами и синтезом протекторных метаболитов [6, 7]. В частности, среди корневых тропизмов

**Key words:** sensor, fiber-optic sensor, amplitude reflective type sensor, vibration sensor, vibration, vibration monitoring

Received on: 17.04.2021

Accepted on: 10.05.2021

## INTRODUCTION

The demand for sensors is growing rapidly due to the development of information and measurement systems, automated control systems and production management. In addition to high metrological characteristics, the sensors should have such properties as low weight, small dimensions, low power consumption, and compatibility with microelectronic information processing devices. These requirements are met to the maximum extent by fiber-optic sensors (FOS) [1, 2].

FOSs are often made of materials that are dielectrics, which eliminates the risk of sparks and, as a result of fire, the fiber itself is resistant to corrosion and radiation. Also FOSs have good performance and low cost, can be located at a great distance from the controlled object, it is possible to serially connect many sensitive elements in one line, there are also distributed fiber-optic sensors [1, 3, 4, 5]. Their use is especially interesting in new, interdisciplinary areas: for example, in monitoring the acoustic fields of flora and fauna of various natural locations (in the field of physiology and regulation of plant growth, zoology, agrobiophotonics, aquaculture, productivity of dairy farming, etc.) distributed sensors operating on ultra-weak backscattered signals and requiring complex signal processing are almost not applicable. In such cases, the best practical solutions would be either quasi-distributed sensors or point sensor arrays. Quasi-distributed sensors require a rather serious and expensive hardware base, while simple point FOSs can be the optimal solution.

Thus, it is known that plants are sensitive to vibration of water, soil, insects-pollinators, insects that eat plants and react to these effects by movement, tropisms and the synthesis of protective metabolites [6, 7]. In particular, among root tropisms, the movement of plants in the direction of vibrations generated by flowing water was found, but the sound recording of flowing water did not cause such a reaction, therefore, the plant reacts to low-frequency mechanical vibrations [6, 8]. However, the absence of highly sensitive sensors, the operation of which does not depend on external electric fields and electromagnetic oscillations, sound interference, high humidity and the



обнаружено движение растений в направлении вибраций, образуемых текущей водой, но звукозапись текущей воды такой реакции не вызывала, следовательно, растение реагирует на низкочастотные механические колебания [6, 8]. Однако отсутствие высокочувствительных датчиков, работа которых не зависит от внешних электрических полей и электромагнитных колебаний, звуковых помех, высокой влажности и угрозы биоповреждений, ограничивает развитие таких исследований. Также известна чувствительность животных к вибрациям и нерегулярным механическим колебаниям, вызванным другими живыми системами, а также природными и антропогенными явлениями, такими как тектонические явления, природные, биогенные и техногенные колебания земли и водной среды. Особенно важны они для гидробионтов [9, 10]. Данные явления также недостаточно изучены, а их понимание, кроме новых фундаментальных знаний, дает возможность использования для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства.

Результаты реализации настоящей разработки являются важными для нового междисциплинарного направления – агробифотоники, дают ключ к более тонкому и точному изучению виброчувствительности животных и вибротропизма растений, к использованию данного феномена для управления ростом и продуктивностью культурных растений как в условиях светокультуры, так и в условиях открытого грунта, разведением и увеличением продуктивности сельскохозяйственных животных и аквакультуры.

Дальнейшим направлением работы является реализация конструкции с возможностью регистрации двух осей вибрации. Также в работе [11] была продемонстрирована возможность мультиплексирования, которая может быть адаптирована под представленный чувствительный элемент, что открывает возможность дальнейшей модернизации.

Для решения задач мониторинга акустических полей флоры и фауны технически сложно использовать устройства на основе распределенных сенсоров, работающих на сверхслабых сигналах обратного рассеяния, которые требуют сложной обработки для получения информации. В таких случаях лучшими практическими решениями будут либо квазираспределенные датчики, либо массивы точечных сенсоров. Квазираспределенные датчики требуют достаточно серьезной и дорогостоящей аппаратной базы,

threat of biodeterioration, limits the development of such studies. The sensitivity of animals to vibrations and irregular mechanical vibrations caused by other living systems, as well as natural and anthropogenic phenomena, such as tectonic phenomena, natural, biogenic and technogenic vibrations of the earth and the aquatic environment is also known. They are especially important for aquatic organisms [9, 10]. These phenomena are also insufficiently studied, and their understanding, in addition to new fundamental knowledge, makes it possible to use them to increase the productivity of agricultural production.

In measuring technology, the most simple to process the output signal are FOSs based on amplitude modulation of the signal. Amplitude modulation schemes impose practically no special requirements on the source or receiver of radiation [3,12]. Also, FOSs need an additional circuit that processes the output signal of the sensor, since the amplitude-modulated signal is directly recorded using a conventional photodetector [1,13]. In [3], the physical foundations of amplitude modulation methods are considered in detail, the issues of constructing amplitude sensors and their classification are also considered.

In open-type fiber optic sensors [1], the reflective surface is the most complex and expensive part. The reflective surface is susceptible to shape distortion and degradation of reflective characteristics against a background of temperature fluctuations, which can severely degrade sensor performance. In this regard, the problem of creating a reflective element for FOSs, which have a simpler design and low production cost, remains urgent.

A number of works are known aimed at optimizing the circuits of fiber optic sensors with a lens [14–24]. The authors of these works carried out mathematical modeling, which makes it possible to determine the design parameters of fiber-optic converters, at which these designs are the most sensitive.

There are works [25–27] to improve the known from the literature designs of fiber-optic converters of the reflective type, in which modulation is carried out by changing the position of the (mirror) reflecting surface, such designs are mainly used in pressure sensors. In these works, computer modeling and experimental studies were carried out in order to improve the metrological characteristics, reduce optical losses, increase the sensitivity of the presented structures with varying geometric and optical parameters.

Also of great interest are works devoted to modeling the parameters of fiber-optic converters with a reflective attenuator [24], this design is a periodic structure. Analyzing the simulation results, the authors

в то время как простые точечные ВОД могут стать оптимальным решением.

В измерительной технике наиболее простые ВОД в обработке выходного сигнала считают те, которые основаны на амплитудной модуляции. Схемы амплитудной модуляции не предъявляют практически никаких специальных требований к источнику или к приемнику излучения [3, 12]. Также ВОД нуждаются в дополнительной схеме, обрабатывающей выходной сигнал датчика, так как амплитудно-модулированный сигнал непосредственно регистрируется с помощью обычного фотоприемника [1, 13]. В работе [3] подробно рассмотрены физические основы способов модуляции амплитуды, также рассмотрены вопросы построения амплитудных датчиков и их классификация.

В волоконно-оптических датчиках открытого типа [1] отражающая поверхность – самая сложная и дорогая часть. Форма и ее отражающие свойства подвержены непредсказуемым изменениям из-за температурных флуктуаций, что может резко снизить эффективность датчика. В связи с этим актуальна задача создания отражающего элемента для ВОД, которые имеют более простую конструкцию и низкую стоимость производства.

Исследованиями в этом направлении идут по пути проведения математического моделирования конструкции ВОД с целью подбора оптимальных параметров, обеспечивающих максимальную чувствительность [14–24], и по пути создания структуры отражательного элемента [25–27]. Известен ряд работ, направленных на оптимизацию схем волоконно-оптических датчиков с линзой [14–19]. Результаты математического моделирования позволили подобрать такие рабочие параметры волоконно-оптических преобразователей, которые обеспечивают максимальную чувствительность.

В работах [20–23] по усовершенствованию конструкций волоконно-оптических преобразователей отражательного типа модуляция осуществляется благодаря изменению положения отражающей (зеркальной) поверхности, это в основном датчики давления. В работах представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований характеристик датчиков при варьировании их геометрических и оптических параметров. Результатом работ стало улучшение метрологических характеристик, снижение оптических потерь, увеличение чувствительности датчиков.

Интерес представляют результаты работы, посвященные моделированию параметров

of [24] have chosen the optimal parameters of the fiber-optic converter, which provides the maximum sensitivity.

The cited works [14–24] are of interest in terms of the theoretical foundations for modeling amplitude fiber-optic converters (FOCs), which can be used to simulate new FOCs. In addition to works aimed at optimizing the structures that have become standard by varying design parameters in order to increase efficiency, there are known works that are aimed at improving the efficiency of the FOCs by changing the structure of the reflective element [25–27].

The authors of the patent for a fiber-optic microdisplacement sensor [28] proposed the design of a reflective element in the form of a flat relief element (Fig. 1), aimed at increasing the sensitivity by reducing optical losses by matching the mode structure of the reflected radiation with the receiving fiber. The radiation beam formed by the light guide 1 is converted by the reflective element 4 and excites the radiation in the light guide 2. External influences leading to the movement of the reflector 4 cause the intensity modulation of the directional modes of the light guide 2.

The work presents formulas for calculating the height of the relief of the reflecting plate and the total size of the reflecting element. However, this reflective element is difficult to manufacture due to its specific shape. The authors of this patent did not present a solution to the design of the sensor in which this reflective element can be used. It is not clear from the description of the patent what the transformation mechanism looks like; therefore, the limits of applicability and sensitivity of such a FOC are not so obvious.

The authors of the patent “Reflective element for fiber-optic sensor” [29] solved the problem of low sensitivity by manufacturing a reflective surface in the form of a multistage reflective element Fig. 2, however, such a design can hardly be called easy to manufacture, although it is performed by etching, the creation of attenuator zones is strictly regulated by an angle of 70 degrees.

The invention is based on the back reflection of a beam from a glass surface with areas of different reflection coefficients and the passage of this beam into the fiber. When vibration occurs, the end of the fiber begins to vibrate, as a result of which it deviates from its original position. When crossing the boundary of the section, the intensity of the reflected beam changes and, falling back into the FOS waveguide, is detected by a photodetector.

In [30], a fiber-optic sensor is presented that uses a transmissive grating of a periodic structure, a mir-

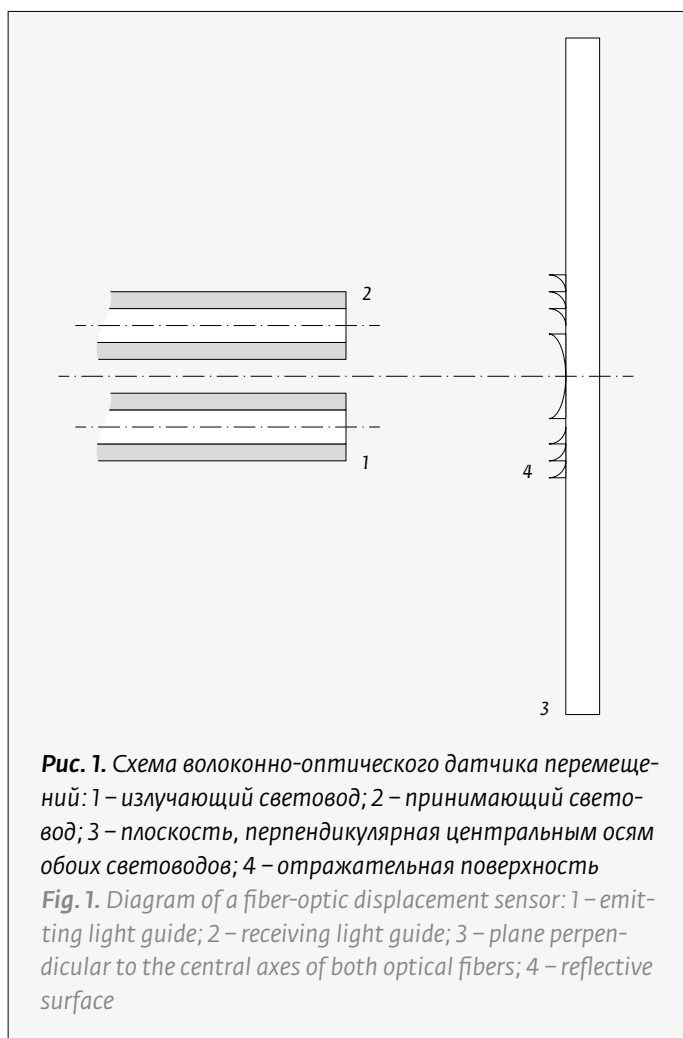
волоконно-оптических преобразователей с отражательным аттенуатором [24]. Внимание обращено на моделирование параметров периодической структуры, которые придают датчику максимальную чувствительность.

Результаты работ [14–24] по теоретическим основам моделирования амплитудных волоконно-оптических преобразователей (ВОП) могут быть использованы для моделирования новых ВОП. Кроме увеличения эффективности ВОП путем оптимизации рабочих параметров конструкций, ставших уже стандартными, известны работы, использующие изменение структуры отражательного элемента [25–27].

Авторами патента волоконно-оптического датчика микроперемещений [28] была предложена конструкция отражательного элемента в виде плоского рельефного элемента (рис. 1). В ней повышение чувствительности идет за счет снижения оптических потерь путем согласования модовой структуры отраженного излучения с приемным световодом. Пучок излучения, формируемый световодом 1, преобразуется отражающим элементом 4 и возбуждает излучение в световоде 2. Внешние воздействия, приводящие к перемещению отражателя 4, обуславливают модуляцию интенсивности направленных мод световода 2.

В работе приведены формулы расчета высоты рельефа отражающей пластины и общего размера отражающего элемента. Но из-за специфичной формы данный отражательный элемент сложно изготавливать. Авторы [28] не представили конструктивное решение датчика, в котором может функционировать данный отражательный элемент. Из описания патента неясно, каким образом выглядит механизм преобразования, поэтому не так очевидны границы применимости и чувствительность такого в. о. п.

Авторы [29] закрепили свое конструктивное решение сенсора патентом «Reflective element for fiber optic sensor». В нем предложено использовать многоступенчатый отражательный элемент (рис. 2). Изобретение основано на обратном отражении луча от поверхности стекла с участками различного коэффициента отражения и прохождении этого луча в волокно. При возникновении вибрации торец волокна начинает совершать колебания, вследствие чего отклоняется от первоначального положения. При пересечении границы участка интенсивность отраженного луча изменяется и, попадая обратно в волновод ВОД, детектируется фотоприемником. Создание аттенуаторных зон строго регламентируется углом наклона



**Рис. 1.** Схема волоконно-оптического датчика перемещений: 1 – излучающий световод; 2 – принимающий световод; 3 – плоскость, перпендикулярная центральным осям обоих световодов; 4 – отражательная поверхность  
**Fig. 1.** Diagram of a fiber-optic displacement sensor: 1 – emitting light guide; 2 – receiving light guide; 3 – plane perpendicular to the central axes of both optical fibers; 4 – reflective surface

ror, and a composite metal element that is sensitive to temperature changes. To register vibration, a structure is used in which the grating is attached to a spring, and when exposed to vibration, the grating deviates from the equilibrium position, thereby modulating the signal. This design is similar to the considered sensor models, however, the periodic structure is used not as a reflective element, but as a barrier between the fiber and the reflective surface.

Based on the works discussed above, it can be concluded that the problem of developing reflective elements of amplitude fiber-optic sensors that are sensitive to certain physical influences, have a simpler design and low production cost, according to the authors, is still unsolved.

The aim of this work is to create a reflective element for amplitude FOSs of vibration of the reflective type. Implementation of an experimental model of a vibration sensor to test the performance of the proposed reflective structure, a series of experiments.

в 70 градусов. И хотя конструкция выполняется при помощи технологии травления, процесс изготовления сложно назвать простым.

В работе [30] представлен волоконно-оптический датчик, использующий пропускающую решетку периодической структуры, зеркало и композитный металлический элемент чувствительный к изменению температуры. Для регистрации вибрации используется конструкция, в которой решетка закрепляется на пружину, и при воздействии вибрации решетка отклоняется от положения равновесия, тем самым модулирует сигнал. Такая конструкция схожа с рассматриваемыми моделями датчиков, однако периодическая структура использована не в качестве отражающего элемента, а как преграда между волокном и отражающей поверхностью.

Анализируя ландшафт работ по оптимизации параметров амплитудных волоконно-оптических датчиков с простой конструкцией и низкой стоимостью, мы убедились, что для них задача создания отражающих элементов, обладающих чувствительностью к определенным физическим воздействиям, пока не решена.

Поэтому целью нашей работы стало создание отражающего элемента для амплитудных ВОД вибрации отражательного типа и проверка работоспособности предложенной отражающей структуры. Для этого был собран экспериментальный макет датчика вибрации и проведены серии экспериментов.

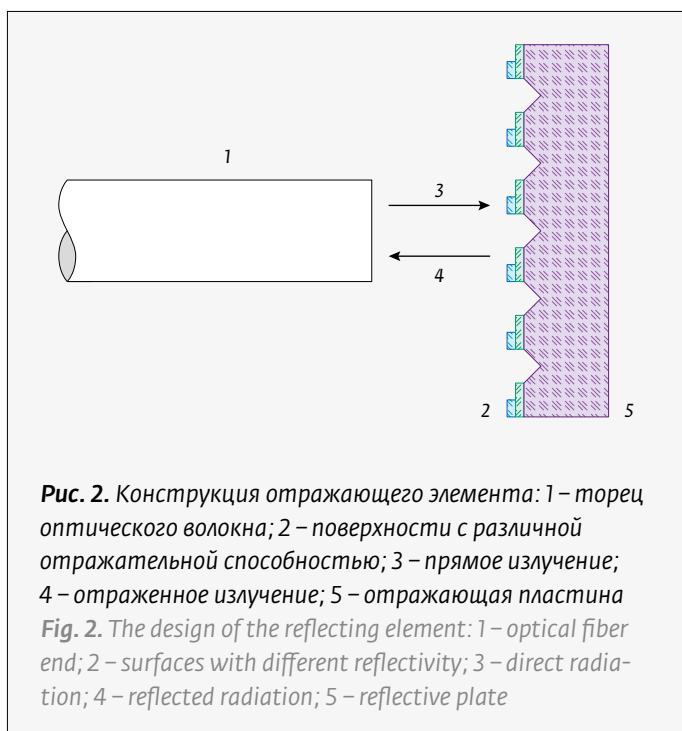
### ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ

Эксперимент направлен на подбор структуры отражающей поверхности для поиска оптимального способа измерения колебаний при одноосевом воздействии. Отражающий элемент может быть представлен различными структурами. Предлагаемый отражающий элемент представляет собой периодическую структуру (рис. 3) в виде чередования полос ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) с коэффициентом отражения  $k_1=0,04$  и золота с коэффициентом отражения  $k_2=0,96$ .

Анализ распределения интенсивности излучения на выходе оптического волокна показал, что оно соответствует гауссову распределению, и свет будет выходить из световода в пределах числовой апертуры:

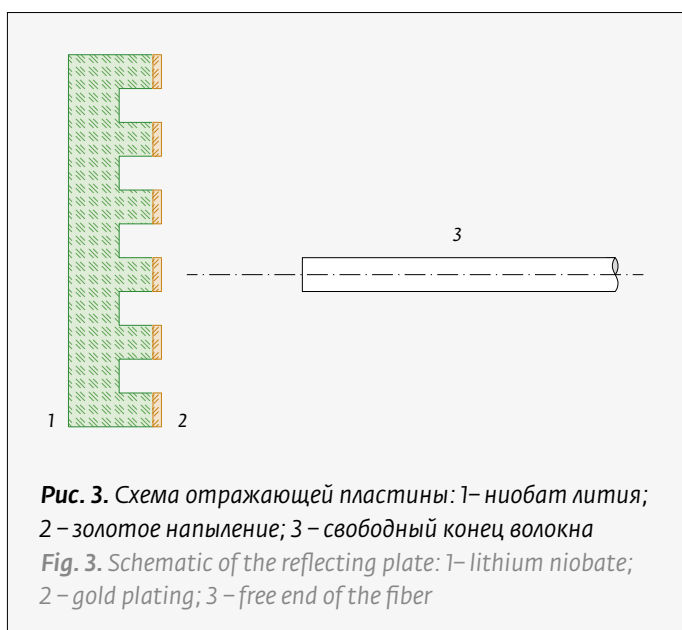
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \theta.$$

В зависимости от расстояния от торца волокна до отражающей поверхности ( $L$ ) и значения число-



### BASIC PRINCIPLE

The reflective element can be represented by various structures. The experiment is aimed at selecting the structure of the reflecting surface in order to find the best option for measuring vibrations in one axis of action. The proposed reflective element is a periodic structure in the form of bands of lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) with a reflection coefficient of  $k_1=0.04$  and gold with a reflection coefficient of  $k_2=0.96$ .



вой апертуры (NA) можно рассчитать радиус «светового» пятна  $R$  и тем самым определить, какой ширины должны быть полосы золота и ниобата лития. Для того чтобы центральная часть гауссова пучка попадала полностью на одну полосу, ширина полос золота и ниобата должна быть  $2R$ . В соответствии с геометрической схемой (рис. 4) между параметрами должны выполняться следующие условия:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{L},$$

$$R = \operatorname{tg} \theta \cdot L = \operatorname{tg}(\arcsin NA) \cdot L.$$

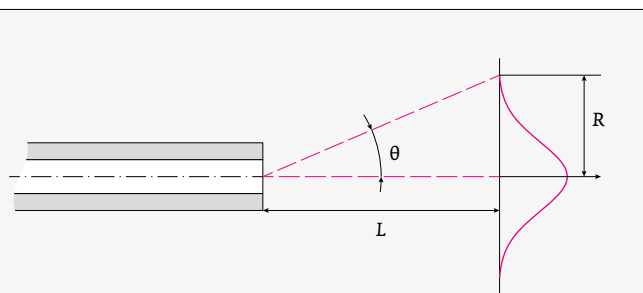
Для обеспечения чувствительности к малым амплитудам колебаний (порядка одного микрометра) необходимо, чтобы центр световода был направлен на границу раздела полос золото/ниобат лития. Так как распределение интенсивности в световом пучке соответствует гауссову распределению, то максимальная интенсивность сосредоточена в центре пучка. Благодаря предложенной схеме измерение производится только в установленном направлении, перпендикулярном направлению штрихов.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Реализован экспериментальный макет амплитудного волоконно-оптического датчика вибрации отражательного типа (рис. 5). Принцип действия чувствительного элемента состоит в следующем. Первоначально оптическое излучение от источника по световоду передается к отражающей пластине в виде полос с разным коэффициентом отражения. Затем отраженный свет частично возвращается в световод и передается на фотоприемный модуль. При действии внешнего вибрационного источника свободный конец волокна совершает колебания. В результате колебательных движений торца отраженный сигнал, принимаемый фотоприемником, оказывается промодулированным.

В изготовленном экспериментальном образце датчика существует возможность перестройки параметров чувствительного элемента: длины свободного оптического волокна, расстояния до отражающей поверхности, смещения отражающей поверхности по двум осям, замены отражающей пластины.

Структурная схема экспериментальная установка ВОД для тестирования отражающей поверхности (рис. 6) содержит источник излучения с длиной волны  $\lambda = 1550$  нм (ИИ); чув-



**Рис. 4.** Распределения интенсивности излучения на отражающей поверхности:  $L$  – расстояние от торца волокна до отражающей поверхности;  $R$  – радиус «светового» пятна на отражающей поверхности;  $\theta$  – максимальный угол ввода излучения в волокно

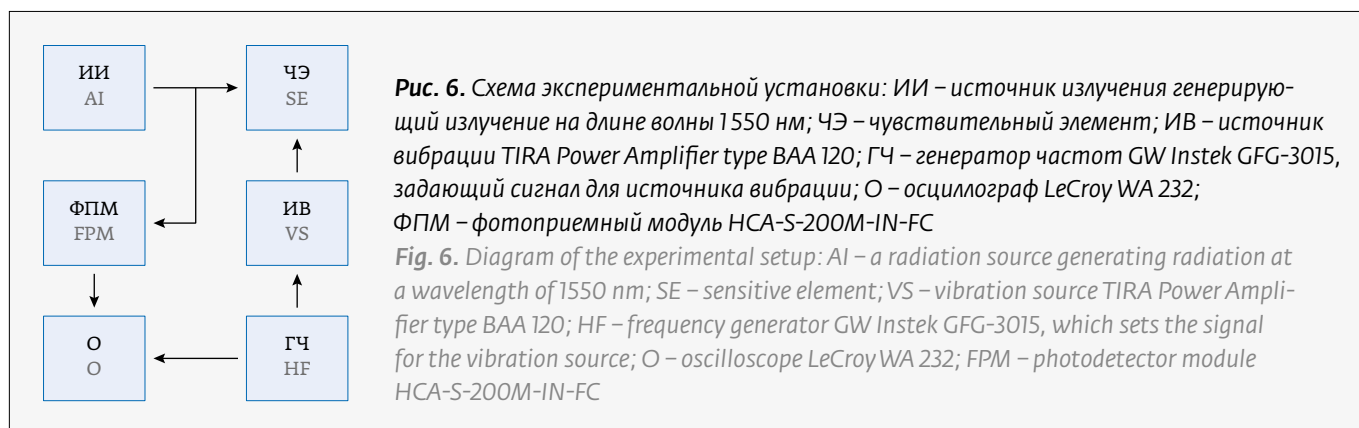
**Fig. 4.** Distribution of radiation intensity on the reflecting surface:  $L$  is the distance from the fiber end to the reflecting surface;  $R$  is the radius of the “light” spot on the reflecting surface;  $\theta$  is the maximum angle of radiation input into the fiber

The analysis of the distribution of the radiation intensity at the output of the optical fiber is carried out. The distribution of the intensity of the light beam in the fiber corresponds to the Gaussian distribution,



**Рис. 5.** Экспериментальный макет амплитудного волоконно-оптического датчика вибрации отражательного типа

**Fig. 5.** Experimental layout of the amplitude fiber-optic vibration sensor of the reflective type



ствительный элемент (ЧЭ); источник вибрации TIRA Power Amplifier type BAA 120 (ИВ); генератор частот GW Instek GFG-3015 (ГЧ), задающий сигнал для источника вибрации; осциллограф LeCroy WA 232 (О), визуализирующий сигнал с фотоприемного модуля HCA-S-200M-IN-FC (ФПМ).

Результат эксперимента представлен на рис. 7. Видно, что генерируемый сигнал (а) в 100 Гц (дorzонансная частота) коррелирует (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,78) с регистрируемым сигналом фотоприемника (b).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Для определения параметров чувствительного элемента волоконно-оптического датчика и разработки его математической модели были рассмотрены поперечные вибрации волоконного световода, закрепленного с одной стороны в чувствительной части разработанного датчика вибрации. При этом учитывались его форма, размеры и материал, использовалась теория механических

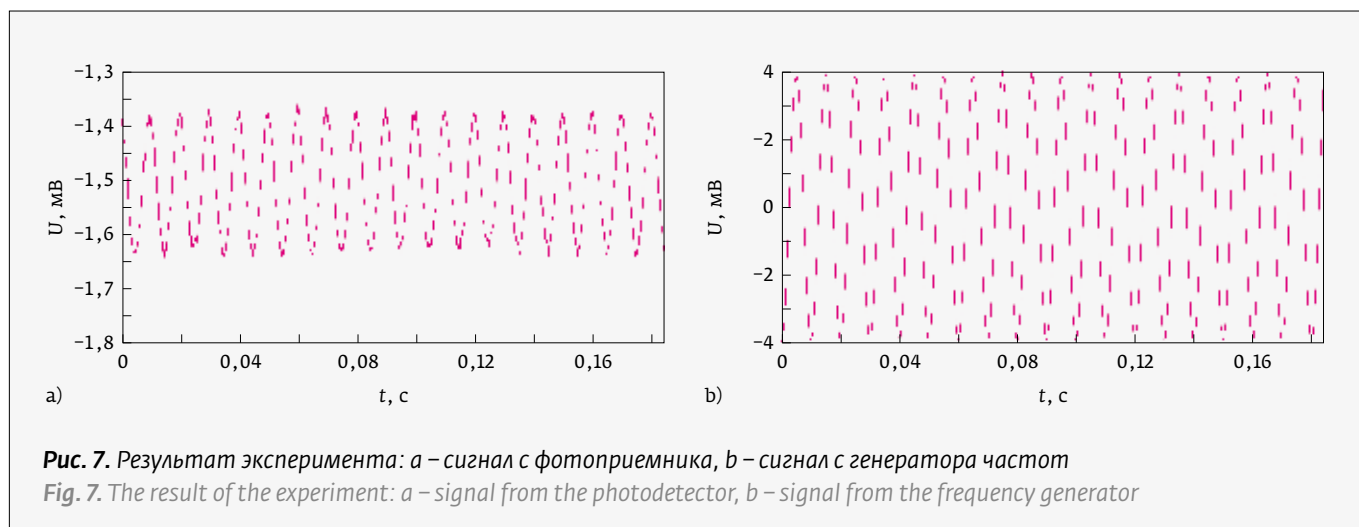
the light will be emitted from the fiber within the numerical aperture.

Depending on the distance from the end of the fiber to the reflective surface ( $L$ ) and the numerical aperture ( $NA$ ) you can calculate the radius of the “light” spot  $R$ , thereby determining how wide the strip of gold and lithium niobate should be. The bands of gold and niobate must be  $2R$  wide in order for the entire Gaussian beam to fit into one band.

For sensitivity to small amplitudes (on the order of microns) of vibrations, it is necessary that the centre of the fiber be directed to the gold/lithium niobate media section, since the intensity distribution in the light beam corresponds to a Gaussian distribution, that is, the maximum intensity is concentrated in the centre of the beam. Due to the proposed structure, the measurement is performed only in the specified direction, perpendicular to the direction of the strokes.

### EXPERIMENT

An experimental model of an amplitude fiber-optic vibration sensor of a reflective type has been





колебаний балки постоянного сечения [31, 32]. Для моделирования колебаний световода использовалось дифференциальное уравнение поперечных колебаний для однородной балки постоянного сечения:

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = q_y,$$

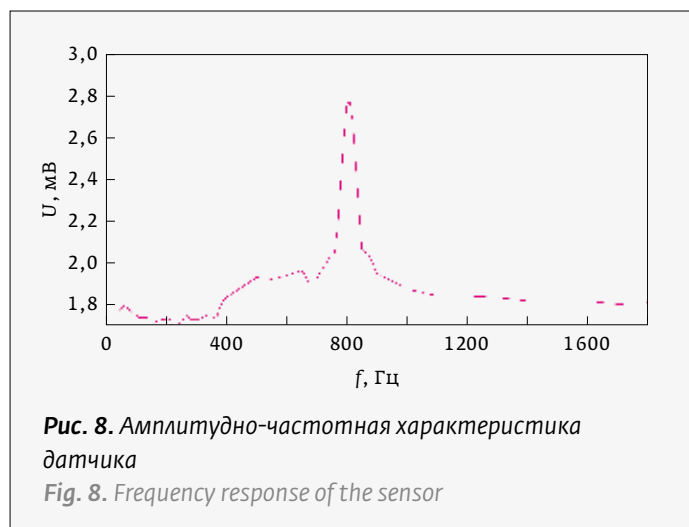
где  $m_0$  – масса световода;  $u_y(x, t)$  – локальное поперечное смещение волокна в направлении, перпендикулярном оси волокна, зависящее от координаты  $x$  и от времени  $t$ ;  $E$  – модуль Юнга;  $J_z$  – момент инерции относительно главной центральной оси поперечного сечения;  $q_y$  – интенсивность возмущающей силы.

Возмущающая нагрузка учитывается в граничных условиях, установившиеся вынужденные колебания будут совершаться с частотой возмущающей силы. Поэтому уравнение движения волокна будет описываться как произведение амплитудной части смещения  $u(x)$  и гармонической функции

$$u(x, t) = u(x) \cos \omega t.$$

Для верификации математической модели экспериментально определена амплитудно-частотная характеристика (рис. 8). Из функциональной зависимости видно, что амплитуда медленно нарастает с ростом частоты вплоть до границы резонанса, где амплитуда резко увеличивается после прохождения зоны резонанса, амплитуда возвращается на уровень до резонанса и практически не меняется, резонансная частота  $f \approx 800$  Гц.

Инерционной массой в датчике является само волокно. При воздействии на ЧЭ виброускорения свободный конец волокна будет отклоняться,



implemented. The principle of operation of the sensitive element is as follows. Optical radiation from the source through the light guide is transmitted to the reflecting plate with stripes with different reflectances, the reflected light partially returns to the light guide and is transmitted to the photodetector module. When exposed to vibration, the free end of the fiber vibrates, as a result of which the signal received by the photodetector module is modulated.

In the manufactured experimental sample of the sensor (Fig. 5) there is a possibility of tuning the parameters of the sensitive element, namely, the length of the free optical fiber, the distance to the reflecting surface, the possibility of displacing the reflecting surface along two axes, the possibility of replacing the reflecting plate.

FOS experimental setup for testing a reflective surface is shown in Fig. 6. It contains a radiation source (IR) that generates radiation at a wavelength of 1550 nm; sensitive element (SE); mounted on a vibration source TIRA Power Amplifier type BAA 120 (VS); frequency generator GW Instek GFG-3015 (FG) setting signal for the vibration source; oscilloscope LeCroy WA 232 (O), which picks up a signal from the photodetector module HCA-S-200M-IN-FC (PDM).

The result of the experiment is shown in Fig. 7. It can be seen from the figure that the generated signal (a) at 100 Hz (pre-resonant frequency) correlates (Pearson's correlation coefficient is 0.78) with the recorded signal of the photodetector (b).

## MODELING THE PARAMETERS OF THE SENSITIVE ELEMENT

To determine the parameters of the sensitive element of the fiber-optic sensor and develop a mathematical model, the transverse vibrations of the fiber light guide, fixed on one side in the sensitive part of the developed vibration sensor, are considered, taking into account its shape, size, and material, using the theory of mechanical vibrations of a beam of constant cross-section [31, 32]. To simulate the vibrations of the fiber, we used the differential equation of transverse vibrations for a uniform beam of constant cross-section:

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = q_y \quad (1)$$

the disturbing load is taken into account in the boundary conditions, steady forced oscillations will be performed with the frequency of the disturbing force. Therefore, the equation of motion of the fiber

представляя собой гармонический осциллятор. Параметры оптического волокна и характеристики кварца:  $r=2203 \text{ кг/м}^3$  – плотность кварцевого волокна;  $E=58 \text{ ГПа}$  – технический модуль Юнга для кварцевого стекла;  $d=125 \text{ мкм}$ ;  $l=10 \text{ мм}$  – длина консольной части опытного образца;

Собственные частоты колебательной системы определяются выражением:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\eta^2 r}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 873 \text{ Гц.}$$

На рис. 9 представлена теоретическая зависимость собственной частоты от длины свободного волокна, из которого видно, что более привлекательными за счет дальнего резонанса являются малая длина свободного волокна. Но такие длины будут обладать малой сейсмической массой и большой жесткостью, что приведет к снижению чувствительности датчика такой конструкции. Видно, что теоретическая собственная частота колебаний коррелирует с полученными данными резонансных частот (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,977). Учитывая результаты математической модели и результаты, полученные опытным путем, была подобрана длина свободного волокна, равная 10 мм, так как на данной длине сейсмическая масса

will be described as the product of the amplitude part of the displacement  $u(x)$  and the harmonic function

$$u(x,t) = u(x) \cos \omega t. \quad (2)$$

To verify the mathematical model, the amplitude-frequency characteristic was experimentally determined, shown in Fig. 8, from which it can be seen that the amplitude slowly increases with increasing frequency up to the resonance boundary, where the amplitude sharply increases after passing through the resonance zone, the amplitude returns to the level before resonance and practically does not change, the resonance frequency is  $f \approx 800 \text{ Hz}$ .

The calculation of the natural vibration frequency is carried out according to the formulas (7). The inertial mass in the sensor is the fiber itself. When the SE is subjected to vibration acceleration, the free end of the fiber will deflect, representing a harmonic oscillator.

Optical fiber parameters and quartz characteristics:  $r=2203 \text{ kg/m}^3$  is silica fiber density;  $E=58 \text{ GPa}$  is technical Young's modulus for quartz glass;  $d=125 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $l=10 \text{ mm}$  is the length of the cantilever part of the prototype;

The natural frequencies of the oscillatory system are determined by the expression:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\eta^2 r}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 873 \text{ Hz.}$$

Fig. 9 presents the theoretical dependence of the natural frequency on the length of the free fiber, from which it can be seen that the short length of the free fiber is more attractive due to long-range resonance, but such lengths will have a low seismic mass and high rigidity, which, as a consequence, reduces the sensitivity. It can be seen that the theoretical natural frequency of oscillations correlates with the obtained data of resonance frequencies (Pearson's correlation coefficient is 0.977).

Taking into account the results of the mathematical model and the results obtained experimentally, the length of the free fiber was selected equal to 10 mm, since at this length the seismic mass and stiffness allows measurements at low amplitudes over a wide range of frequencies. When the length of the free fiber is less than 10 mm, the combined effect of this seismic mass and this stiffness makes it impossible to perceive the vibration impact, which requires the introduction of a load (additional seismic mass) into the structure. When the length of the free fiber

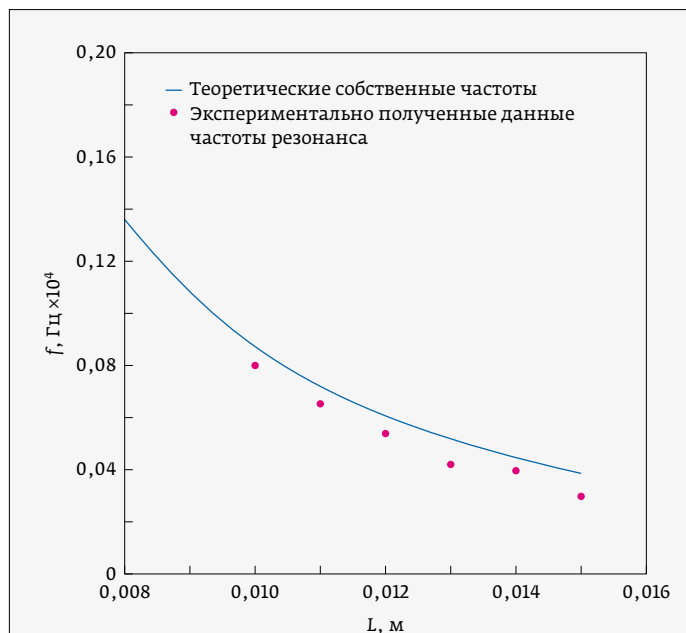


Рис. 9. Теоретическая зависимость собственной частоты от длины свободного волокна

Fig. 9. Theoretical dependence of the natural frequency on the length of the free fiber



и жесткость позволяют проводить измерения при малых амплитудах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы предложен отражающий элемент в виде периодической структуры. Данный отражающий элемент прост в конструкции, благодаря своей периодической структуре и расположению штрихов регистрируется только одна ось вибрации, а юстировка на раздел сред позволяет обеспечить чувствительность к малым смещениям порядка микрометра. Из представленных в работе данных очевидно, что эксплуатационные характеристики макета удовлетворительно соответствуют требованиям к ВОД схожих типов, при этом в работе [30] используется в качестве упругого элемента не волокно, (которое является достаточно надежным материалом – однородным, упругим со стекловидной структурой), что усложняет и увеличивает стоимость такой конструкции. Кроме того, в большинстве известных авторам работ предъявляются высокие требования к изготовлению отражательного элемента, в работе [29] датчик производит измерение вибрации в диапазоне 5–1000 Гц, однако зона аттенюации регламентирована углом в 70 градусов и имеет многоступенчатый профиль.

В настоящей работе использовался отражательный элемент, периодическая структура в котором создавалась путем пропила под прямым углом. Также зачастую в конструкции чувствительного элемента присутствуют и излучающее волокно, и принимающее. Поэтому в работе предложена конструкция, содержащая комбинацию в одном волокне приемника и передатчика. Отражающая поверхность, как и чувствительный элемент, основанный на ее использовании, просты в изготовлении, при этом чувствительный элемент, использующий в своей конструкции предлагаемую отражающую пластину, сохранил малый вес и габариты.

Созданный авторами экспериментальный чувствительный элемент имеет резонанс в 800 Гц, что метрологически является верхней границей измерений, однако в настоящей работе использовался экспериментальный макет, представляющий собой не монолитную конструкцию, а составную платформу с возможностью перестройки параметров, подобное исполнение негативно сказывается на измерительном диапазоне.

Реализованный экспериментальный образец датчика вибрации планируется применять в исследованиях, относящихся к новому меж-

is more than 10 mm, the resonance frequency is shifted to the frequencies of interest.

## CONCLUSION

As a result of this work, a reflecting element in the form of a periodic structure was proposed. This reflective element is simple in design, due to its periodic structure and the arrangement of the grooves, only one vibration axis is recorded, and the adjustment to the media section ensures sensitivity to small displacements of the order of a micrometer. From the data presented in the work, it is obvious that the operational characteristics of the model satisfactorily meet the requirements for the FOSs of the similar types, while in work [30] is used as an elastic element is not a fiber (which is a fairly reliable material – homogeneous, elastic with a glassy structure), which complicates and increases the cost of such a structure. In addition, in most of the works known to the authors, high requirements are imposed on the manufacture of a reflective element, in [29] the sensor measures vibration in the range of 5–1000 Hz, but the attenuation zone is regulated by an angle of 70 degrees and has a multi-stage profile.

In this work, we used a reflective element, the periodic structure of which was created by sawing at right angles. Also, often in the design of the sensitive element there are emitting fibers and receiving ones, the design proposed in this work combines the role of a receiver and a transmitter in one fiber. The reflecting surface, as well as the sensing element based on its use, are easy to manufacture, while the sensing element, using the proposed reflective plate in its design, retained its low weight and dimensions.

The experimental sensing element created by the authors has a resonance of 800 Hz, which is metrologically the upper limit of measurements, however, in this work, an experimental model was used, which is not a monolithic structure, but a composite platform with the possibility of adjusting parameters; such a design negatively affects the measuring range.

One of the technical areas of application of this development is the study of plant responses to mechanical vibrations.

The results of the implementation of this development are important for a new interdisciplinary direction – agrobiophotonics, provide the key to a more subtle and accurate study of the vibration sensitivity of animals and vibrotropism of plants, to the use of this phenomenon to control the growth



дисциплинарному направлению агробиофотоники, в вопросах управления развитием корневой системы и увеличения продуктивности сельскохозяйственных растений воздействием вибрации, проведении исследований по сортовому физиологическому ответу в диапазоне амплитуд вибрации 0,1–5 мм. В патенте [33] описан способ воздействия на почву вибрацией частотой 5–10 Гц и амплитудой 0,5–1 мм, в результате чего формируется плоская корневая система, способствующая росту растения (в данном случае – томат, болгарский перец).

Также планируется продолжить исследования по отработке технологии повышения зерновой продуктивности при вибрационном воздействии. Основанием для этого стали результаты исследований [34], проведенных в 2007–2009 годах, когда семена яровой и озимой пшеницы подвергались вибрации с частотой 70 Гц и амплитудой 0,5 мм в течение 12 и 14 часов. Был продемонстрирован эффект вибрационной обработки семян пшеницы, который проявлялся: в ускорении перехода растений к генеративной фазе развития; в усилении роста побегов; в стимулировании кущения и в увеличении зерновой продуктивности растений. Полученные данные указывают, что такой

and productivity of cultivated plants, both in photoculture conditions and in open field conditions., breeding and increasing the productivity of farm animals and aquaculture.

A further area of work is the implementation of a structure with the ability to register two vibration axes. Also in [33], the possibility of multiplexing was demonstrated, which can be adapted to the presented sensitive element, which opens up the possibility of further modernization.

Research is also planned to develop a technology for increasing grain productivity under vibration. Research carried out [34] in 2007–2009, seeds of spring and winter wheat were subjected to vibration with a frequency of 70 Hz and an amplitude of 0.5 mm for 12 and 14 hours. It is shown that the effect of vibration treatment of wheat seeds can manifest itself: in accelerating the transition of plants to the generative phase of development; in enhancing the growth of shoots; in stimulating tillering and in increasing the grain productivity of plants. The data obtained indicate that such a dynamic factor as vibration affects the epigenetic level. Vibration treatment of wheat seeds did not cause an increase in the number of chromosomal rearrangements, which confirmed the previously known facts about

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
 САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
 МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
 НЦМУ «ПЕРЕДОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»  
 ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
 ОБЪЕДИНЕННАЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ  
 ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ  
 ЦЕНТР ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

20-22 СЕНТЯБРЯ 2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

## X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. CAD-CAM-CAE СИСТЕМЫ.
2. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ.
3. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.
4. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ РЕЗКИ, ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ
5. МЕТРОЛОГИЯ, СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ДЕФЕКТΟΣКОПИЯ.

Тел./Факс: +7 (812) 552-98-43 e-mail: [ilwt@ilwt.smtu.ru](mailto:ilwt@ilwt.smtu.ru), [e.pozdeeva@lrc.ru](mailto:e.pozdeeva@lrc.ru)  
 Web-site: [www.btl.smtu.ru](http://www.btl.smtu.ru)



динамический фактор, как вибрация, воздействует на эпигенетическом уровне. Вибрационная обработка семян пшеницы не вызвала увеличения числа хромосомных перестроек, что подтвердило ранее известные факты об отсутствии влияния вибрации на перестройки хромосом.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания с номером государственной регистрации темы АААА-А19-119051390040-5.

## REFERENCES

1. **Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А.** Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета». Ч. I. – С-Пб.: Политехника. 2018. 187 с.
2. **Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугодников А. П., Поспелов В. И.** Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении. *Фотон-экспресс*. 2005; 6: 128–140.
3. **Бусурин В. И., Носов Ю. Р.** Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
4. **Джексон Р. Г.** *Новейшие датчики* / пер. с англ. под ред. В. В. Лучинин – М: Техносфера. 2007. 384 с.
5. **Окоси Т. и др.** Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. 1990. 256 с.
6. **Appel H. M., Cocroft R. B.** Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia* 2014;175:1257–1266.
7. **Gagliano, M., Grimonprez, M., Depczynski, M. et al.** Tuned in: plant roots use sound to locate water. *Oecologia*. 2017;184:151–160.
8. **Muthert L., Izzo L. G., van Zanten M., Aronne G.** Root Tropisms: Investigations on Earth and in Space to Unravel Plant Growth Direction. *Frontiers in plant science*. 2020; 10:1807.
9. **Bouffanais R., Weymouth G. D. and Yue Dick K. P.** Hydrodynamic object recognition using pressure sensing. *Proc. R. Soc. A*. 2011; 467:19–38.
10. **Yoshizawa M., Jeffery W. R., van Netten S. M., McHenry M. J.** The sensitivity of lateral line receptors and their role in the behavior of Mexican blind cavefish (*Astyanax mexicanus*). *J. Exp. Biol.* 2014; 217(Pt 6):886–895.
11. **Lee Y.-G., Kim D.-H., Kim J.-H., Kim Y.-Y., Kim C.-G.** Wavelength division multiplexing technique for grating panel-based fiber optic sensor. *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*. 2012. doi:10.1117/12.975145.
12. **Кузнецов В. П., Иванов А. А., Кудряшов Б. П.** Проектирование средств измерения параметров технологических объектов на основе волоконно-оптических преобразователей. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. 2013; 84.
13. **Todd M. D., Johnson G. A. Vohra S. T.** Deployment of Fiber Bragg Grating-Based Measurement System in a Structural Health Monitoring Application. *Smart Materials and Structures*. 2001;10:534–539.
14. **Вознесенская А. О., Мешковский И. К., Миронов С. А., Попков О. С.** Оптимизация схемы амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа. *Оптический журнал*. 2007; 74(6): 31–35.
15. **Голубинский Ю. М., Зуев В. Д., Кривулин Н. П.** Математическая модель волоконно-оптического датчика перемещения со сферической линзой. *Датчики и системы*. 2009; 3: 15–18.
16. **Зуев В. Д., Кривулин Н. П., Волков В. С., Мурашкина Т. И.** Методика определения конструктивных параметров волоконно-оптического преобразователя с управляющим элементом в виде шаровой линзы. *Авиакосмическое приборостроение*. 2008;10: 27–29.
17. **Guzowski B., Lakomski M.** Realization of fiber optic displacement sensors. *Optical Fiber Technology*, 2018; 41: 34–39. doi:10.1016/j.yofte.2017.12.018.
18. **Murashkina T. I., Motin A. V., Badeeva E. A.** Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element / *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*: 012101 – January 2017. – Vol. 803(1). – The IV Mezhd. Conf. «Information technologies in the industry and production» ITBI – 2016.
19. **Мотин А. В., Белов В. Н., Мурашкина Т. И.** Определение конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптического преобразователя

the absence of the effect of vibration on chromosome rearrangements.

## FUNDING

The work was carried out within the framework of a state assignment with the topic state registration number АААА-А19-119051390040-5.

## REFERENCES

1. **Murashkina T. I., Badeeva E. A.** *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTC "Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem" Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta". I. – S-Pb.: Politehnika. 2018. 187 p.*
2. **Garmash V. B., Egorov F. A., Kolomic L. N., Neugodnikov A. P., Pospelov V. I.** *Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremenном priborostroenii. Foton-ekspress. 2005; 6: 128–140.*
3. **Busurin V. I., Nosov YU. R.** *Volokonno-opticheskie datchiki: Fizicheskoe osnovy, voprosy rascheta i primeneniya. – M.: Energoatomizdat, 1990. 256 p.*
4. **Dzhekson R. G.** *Novejschie datchiki / per. s angl. pod red. V. V. Luchinin – M: Tekhnosfera. 2007. 384 p.*
5. **Okosi T. et al.** *Volokonno-opticheskie datchiki / Pod red. T. Okosi: Per. s yapon. – L.: Energoatomizdat. 1990. 256 p.*
6. **Appel H.M, Cocroft R. B.** *Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. Oecologia 2014;175:1257–1266.*
7. **Gagliano, M., Grimonprez, M., Depczynski, M. et al.** *Tuned in: plant roots use sound to locate water. Oecologia. 2017;184:151–160.*
8. **Muthert L., Izzo L. G., van Zanten M., Aronne G.** *Root Tropisms: Investigations on Earth and in Space to Unravel Plant Growth Direction. Frontiers in plant science. 2020; 10:1807.*
9. **Bouffanais R., Weymouth G. D. and Yue Dick K. P.** *Hydrodynamic object recognition using pressure sensing. Proc. R. Soc. A. 2011; 467:19–38.*
10. **Yoshizawa M., Jeffery W. R., van Netten S. M., McHenry M. J.** *The sensitivity of lateral line receptors and their role in the behavior of Mexican blind cavefish (Astyanax mexicanus). J. Exp. Biol. 2014; 217(Pt 6):886–895.*
11. **Lee Y.-G., Kim D.-H., Kim J.-H., Kim Y.-Y., Kim C.-G.** *Wavelength division multiplexing technique for grating panel-based fiber optic sensor. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. 2012. doi:10.1117/12.975145.*
12. **Kuznecov V. P., Ivanov A. A., Kudryashov B. P.** *Proektirovanie sredstv izmereniya parametrov tekhnologicheskikh ob'ektov na osnove volokonno-opticheskikh preobrazovatelej. – Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta. 2013; 84.*
13. **Todd M. D., Johnson G. A. Vohra S. T.** *Deployment of Fiber Bragg Grating-Based Measurement System in a Structural Health Monitoring Application. Smart Materials and Structures. 2001;10:534–539.*
14. **Voznesenskaya A. O., Meshkovskij I. K., Mironov S. A., Popkov O. S.** *Optimizaciya skhemy amplitudnogo volokonno-opticheskogo preobrazovatelya otrazhatel'nogo tipa. Opticheskij zhurnal. 2007; 74(6): 31–35.*
15. **Golubinskij YU.M., Zuev V. D., Krivulin N. P.** *Matematicheskaya model' volokonno-opticheskogo datchika peremeshcheniya so sfericheskoy linzoy. Datchiki i sistemy. 2009; 3: 15–18.*
16. **Zuev V. D., Krivulin N. P., Volkov V. S., Murashkina T. I.** *Metodika opredeleniya konstruktivnykh parametrov volokonno-opticheskogo preobrazovatelya s upravlyayushchim elementom v vide sharovoy linzy. Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2008;10: 27–29.*
17. **Guzowski B., Lakomski M.** *Realization of fiber optic displacement sensors. Optical Fiber Technology, 2018; 41: 34–39. doi:10.1016 / j.yofte.2017.12.018.*
18. **Murashkina T. I., Motin A. V., Badeeva E. A.** *Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element / Journal of Physics: Conference Series (JPCS): 012101 – January 2017. – Vol. 803(1). – The IV Mezhd. Conf. "Information technologies in the industry and production" ITBI – 2016.*
19. **Motin A. V., Belov V. N., Murashkina T. I.** *Opredelenie konstruktivnykh parametrov opticheskoy sistemy volokonno-opticheskogo preobrazovatelya mikroperemeshcheniya dlya datchika uskoreniya s moduliruyushchim elementom v vide cilindricheskoy linzy. Materialy konferencii:*

# VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ «ВКВО-2021»

Пермь, 5-8 октября 2021 г.

Регистрация до 10 сентября 2021 г.  
на сайте: [www.fibopt.ru/rfo2021/](http://www.fibopt.ru/rfo2021/)

## Тематика конференции

- Волоконные световоды;
- Волоконно-оптические кабели;
- Волоконно-оптические системы связи и передачи информации;
- Компоненты и устройства волоконной оптики;
- Волоконные лазеры и усилители;
- Волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин;
- Наноматериалы и нанотехнологии в волоконной оптике;
- Агробиофотоника;
- Медицинская фотоника;
- Нанофотоника;
- Фотонные интегральные схемы и радиофотоника;
- Другие актуальные вопросы современной волоконной оптики и смежных областей.

## Организаторы



ЦЕНТР НТИ  
ФОТНИКА



- микроремещения для датчика ускорения с модулирующим элементом в виде цилиндрической линзы. *Материалы конференции: Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоёмком приборостроении («СВЕТ\_2018»)*. 2018;14–19.
20. **Бадеева Е. А.** Конструирование волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа. *Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг: науч. тр. – М.: Росавиакосмос: ГОУ ВПО МГУЛ*. 2005; 7: 202–213.
  21. **Бростилова Т. Ю., Бростилов С. А., Кусаинов А. В., Серсенбеков С. Ж., Байсанов А. З.** Методика расчета конструктивных параметров волоконно-оптического преобразователя давления. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2016; 1: 401–404.
  22. **Вознесенская А. О.** Амплитудный волоконно-оптический преобразователь отражательного типа для датчика давления. *Известия вузов. Приборостроение*. 2012; 55(4): 60–64.
  23. **Бадеева Е. А.** Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2016; 4(40):102–113.
  24. **Кривулин Н. П., Крупкина Т. Ю., Мурашкина Т. И.** Методика расчета и выбора конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптического преобразователя давления с отражательным аттенуатором. *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2008; 1: 322–325.
  25. **Li Y., Guan K., Hu Z., Chen Y.** An Optical Fiber Lateral Displacement Measurement Method and Experiments Based on Reflective Grating Panel. *Sensors*. 2016; 16(6): 808. doi:10.3390/s16060808/
  26. **Lee Y.-G., Park S.-O., Kim D.-H., Jang B.-W., Kim C.-G.** Characteristics of reflection-type optical fiber sensor system using one grating panel. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2009. doi: 10.1117/12.817003
  27. **Lee Y.-G., Kim Y.-Y., Kim C.-G.** Fiber optic displacement sensor with a large extendable measurement range while maintaining equally high sensitivity, linearity, and accuracy. *Review of Scientific Instruments*. 2012; 83(4), 045002. doi: 10.1063/1.3698586.
  28. Патент РФ 1606853. *Волоконно-оптический датчик микроремещений* / Аджалов В. И., Голуб М. А., Сисакян И. Н., Сојфер В. А.
  29. Патент № 008995798. *Reflective element for fiber optic sensor* / Alexander Paritsky, Alexander Kots, Yuvi Kahana.
  30. Патент № 8934740B2. *Fiber optic sensor using transmissive grating panel and mirror* / Chun-Gon Kim, Yeon-Gwan Lee, Byeong-Wook Jang, Jin-Hyuk Kim, Yoon-Young Kim.
  31. **Хазанов Х. С.** *Механические колебания систем с распределенными параметрами*. – Самара: СГАУ. 2002. 80 с.
  32. **Сагирова А. Р., Никулин И. Л.** *Моделирование волоконно-оптического датчика вибрации*. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием (г. Пермь, 15–18 мая 2019 г.) / гл. ред. А. П. Шкарапута. – Электронное издание. – Пермь: ПГНИУ. 2019. 428 с.
  33. Патент РФ 2603589. *Способ управления развитием корневой системы растений воздействием вибрации* / Шапин В. И., Огурцов Ф. Б.
  34. **Делоне Н. Л., Беркович Ю. А., Смолянина С. О., Зяблова Н. В., Соловьев А. А., Большакова Л. С.** Стимуляция роста у пшеницы под воздействием вибрации. *Доклады Академии наук*. 2010; 434(3): 424–426.
  20. **Бадеева Е. А.** Konstruovanie volokonno-opticheskikh datchikov davleniya otrazhatel'nogo tipa. *Informacionno-izmeritel'naya tekhnika, ekologiya i monitoring: nauch. tr. – M.: Rosaviakosmos: GOU VPO MGUL*. 2005; 7: 202–213.
  21. **Brostilova T.YU., Brostilov S. A., Kusainov A. V., Sersenbekov S.ZH., Bajsanov A. Z.** Metodika rascheta konstruktivnykh parametrov volokonno-opticheskogo preobrazovatelya davleniya. *Innovacionnyye, informacionnyye i kommunikacionnyye tekhnologii*. 2016; 1: 401–404.
  22. **Voznesenskaya A. O.** Amplitudnyj volokonno-opticheskij preobrazovatel' otrazhatel'nogo tipa dlya datchika davleniya. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2012; 55(4): 60–64.
  23. **Badeeva E. A.** Nauchnaya koncepciya proektirovaniya volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkryтым opticheskim kanalom dlya raketno-kosmicheskoy i aviacionnoj tekhniki. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2016; 4(40):102–113.
  24. **Krivulin N. P., Krupkina T.YU., Murashkina T. I.** Metodika rascheta i vybora konstruktivnykh parametrov opticheskoy sistemy volokonno-opticheskogo preobrazovatelya davleniya s otrazhatel'nyy attenuatorom. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"*. 2008; 1: 322–325.
  25. **Li Y., Guan K., Hu Z., Chen Y.** An Optical Fiber Lateral Displacement Measurement Method and Experiments Based on Reflective Grating Panel. *Sensors*. 2016; 16(6): 808. doi: 10.3390/s16060808/
  26. **Lee Y.-G., Park S.-O., Kim D.-H., Jang B.-W., Kim C.-G.** Characteristics of reflection-type optical fiber sensor system using one grating panel. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2009. doi: 10.1117/12.817003
  27. **Lee Y.-G., Kim Y.-Y., Kim C.-G.** Fiber optic displacement sensor with a large extendable measurement range while maintaining equally high sensitivity, linearity, and accuracy. *Review of Scientific Instruments*. 2012; 83(4), 045002. doi: 10.1063/1.3698586.
  28. Патент RF 1606853. *Volokonno-opticheskij datchik mikroperemeshchenij* / Adzh-alov V.I., Golub M.A., Sisakyan I. N., Sojfer V.A.
  29. Патент № 008995798. *Reflective element for fiber optic sensor* / Alexander Paritsky, Alexander Kots, Yuvi Kahana.
  30. Патент № 8934740B2. *Fiber optic sensor using transmissive grating panel and mirror* / Chun-Gon Kim, Yeon-Gwan Lee, Byeong-Wook Jang, Jin-Hyuk Kim, Yoon-Young Kim.
  31. **Hazanov H. S.** *Mekhanicheskie kolebaniya sistem s raspredelennymi parametrami*. – Samara: SGAU. 2002. 80 p.
  32. **Sagirova A. R., Nikulin I. L.** *Modelirovanie volokonno-opticheskogo datchika vibracii*. Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem (g. Perm', 15–18 maya 2019 g.) / gl. red. A. P. SHkaraputa. – Elektronnoe izdanie. – Perm': PGNIU. 2019. 428 p.
  33. Патент RF 2603589. *Sposob upravleniya razvitiem kornevoj sistemy rastenij vozdeystviem vibracii* / SHapin V. I., Ogurcov F. B.
  34. **Delone N. L., Berkovich YU. A., Smolyanina S. O., Zyablova N. V., Solov'ev A. A., Bol'shakova L. S.** Stimulyaciya rosta u pshenicy pod vozdeystviem vibracii. *Doklady Akademii nauk*. 2010; 434(3): 424–426.

## АВТОРЫ

Бурдышева Ольга Васильевна, м.н.с., Лаборатория агробиопоники, Пермский ФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия. Научные интересы: волоконная оптика, волоконно-оптические датчики; корреспондирующий автор, e-mail: Burdyshevaolga@gmail.com.  
ORCID: 0000-0002-7395-4361

Шолгин Евгений Сергеевич, м.н.с., Лаборатория агробиопоники, Пермский ФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия. Научные интересы: волоконная оптика, волоконно-оптические датчики; e-mail: Faler01@yandex.ru.  
ORCID: 0000-0002-8068-8815

Максимов Александр Юрьевич, к. б. н., заведующий лабораторией, Лаборатория агробиопоники, Пермский ФИЦ УрО РАН, с.н.с., Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермский ФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия.  
ORCID: 0000-0003-2591-3351  
WOS Research ID T-8070-2017

## AUTHORS

Burdysheva Olga Vasilievna, junior researcher, Laboratory of Agrobiophotonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia. Research interests: fiber optics, fiber optic sensors; Corresponding author, e-mail: Burdyshevaolga@gmail.com.  
ORCID: 0000-0002-7395-4361

Sholgin Evgeniy Sergeevich, junior researcher, Laboratory of Agrobiophotonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia. Research interests: fiber optics, fiber optic sensors; e-mail: Faler01@yandex.ru.  
ORCID: 0000-0002-8068-8815

Maksimov Alexander Yurievich, Cand.of Science(Biolog.), Head of Laboratory of Agrobiophotonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia.  
ORCID: 0000-0003-2591-3351  
WOS Research ID T-8070-2017

# weldex 201

россварка

201  
лет

20-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЙ

12-15  
ОКТАБРЯ 2021

РОССИЯ  
МОСКВА  
КРОКУС ЭКСПО

ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД  
WELDEX.RU

0+

+7 (495) 799-55-85  
weldex@hyve.group

Официальная  
поддержка:



Генеральный  
информационный  
партнер:



Журнал  
«Сварочное производство»

