

*Е. А. Шачнева*

## СПОСОБЫ ЮСТИРОВКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

*E. A. Shachneva*

### MAIN TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FIBER-OPTIC FLUID FLOW VELOCITY SENSOR AND SENSOR'S ADJUSTMENTS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** К средствам измерения скорости подачи топлива на борту воздушного судна предъявляются высокие требования по искро-взрывопожаробезопасности, а также отсутствию вредных электромагнитных воздействий, удобству монтажа, точности измерений и сохранению работоспособности в тяжелых условиях эксплуатации. Для применения в таких условиях хорошо себя зарекомендовали волоконно-оптические средства измерений. Несмотря на очевидные преимущества по сравнению с существующими аналогами, волоконно-оптические датчики не получили широкого распространения на отечественном рынке средств измерений. Во многом основной причиной тому послужило отсутствие достаточной информации о технологических особенностях проведения процедуры юстировки и настройки волоконно-оптических датчиков. В данной статье рассматриваются особенности проведения таких процедур и их эффективность при проектировании и изготовлении волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости (ВОДСДЖ). **Материалы и методы.** Для улучшения метрологических характеристик волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости разработана технология его юстировки и технология точного позиционирования оптического волокна относительно источника и приемника излучения. **Результаты.** Определены основные критерии и функции юстировки волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости. Улучшены основные технические и метрологические характеристики волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости в тяжелых эксплуатационных условиях. На основании полученных экспериментальных данных сформированы основные технические характеристики датчика. **Выводы.** Разработанная технология юстировки и технология позиционирования оптического волокна относительно источника и приемников излучения ВОДСДЖ позволяет добиться повышения чувствительности преобразования оптических сигналов в 1,5 раза. При правильном проведении процедуры юстировки снижается количество дополнительных погрешностей, влияющих на увеличение изгибов оптического волокна.

**A b s t r a c t. Background.** The means of measuring the speed of fuel on Board the aircraft subject to high demands on intrinsically-explosion-fire safety without harmful electromagnetic interference, ease of installation, accuracy and preservation of health in extreme conditions. Fiber-optic measuring instruments have proven themselves well for use in such conditions. Despite the obvious advantages over existing analogues, fiber-optic sensors are not widely used in the domestic market of communication equipment. In many ways, the main reason for this was the lack of sufficient information about the technological features of the procedure for adjusting and configuring fiber-optic sensors. This article discusses the features of such procedures

and their effectiveness. **Materials and methods.** To improve the metrological characteristics of the fiber-optic fluid flow velocity sensor, the technology of its alignment and the technology of precise positioning of the optical fiber relative to the radiation source and receiver have been developed. **Results.** The main criteria and functions of adjustment of fiber-optic sensors of liquid flow velocity are determined. The main technical and metrological characteristics of fiber-optic liquid flow velocity sensors in severe operating conditions have been improved. Based on the obtained experimental data, the main technical characteristics of the sensor are formed. **Conclusions.** The developed technology of alignment and positioning of the optical fiber relative to the source and receivers of the radiation of the fiber-optic fluid flow velocity sensor allows to increase the sensitivity of optical signal conversion by 1.5 times. If the alignment procedure is carried out correctly, the number of additional errors that affect the increase in the bends of the optical fiber is reduced.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** ракетно-космическая техника, волоконно-оптический датчик скорости потока жидкости, юстировка, волоконно-оптический кабель, метрологические характеристики.

**К e y w o r d s:** rocket and space technology, fiber-optic fluid flow velocity sensor, alignment, fiber-optic cable, metrological characteristics.

#### *Актуальность*

Существующие на данный момент аналоговые и механические системы год за годом утрачивают свою популярность, на смену данным средствам измерения приходят цифровые технологии. Несмотря на очевидные преимущества по функциональным характеристикам, не решенным остается вопрос безопасности и надежности таких систем. В условиях повышения уровня сложности, технологичности и интеграции систем современного воздушного судна или летательного аппарата остро встает вопрос обеспечения безопасности полетов.

Одними из самых надежных и пригодных для эксплуатации в подобных условиях являются волоконно-оптические средства измерений [1]. Но для обеспечения работоспособности волоконно-оптических средств измерений необходимо обеспечить в процессе сборки точную юстировку оптической системы. Данное требование особенно актуально при изготовлении волоконно-оптических датчиков скорости движения жидкости отражательного типа [2]. Именно от качества проведенной юстировки зависит точное позиционирование оптического волокна относительно отражателя, если речь идет о датчиках отражательного типа, реализующих дифференциальную схему преобразования, правильная фиксация оптического волокна внутри волоконно-оптического кабеля, а также улучшение чувствительности средства измерений, обеспечивают повышение точности измерений ВОДСДЖ.

#### *Материалы и методы*

Разработана обобщенная структурно-аналитическая модель дифференциальных ВОДСДЖ, основными элементами которых являются волоконно-оптические преобразователи угловых микроперемещений (ВОПУМП) отражательного типа (рис. 1).

В основе разрабатываемых ВОДСДЖ лежит принцип построения в виде блоков и модулей, данный подход к проектированию позволяет определять технические характеристики каждого блока на стадиях разработки и проектирования или изготовления, что улучшает метрологические, технические и некоторые эксплуатационные характеристики датчика [1].

Как уже было сказано, в основе конструкции ВОДСДЖ лежит дифференциальный ВОПУМП, в состав которого входит оптико-модулирующий элемент (ОМЭ) в виде отражателя, который представляет из себя металлическую пластину с двумя зеркальными отражающими поверхностями [2].

Для передачи силового воздействия жидкостного потока на ВОПУМП в конструкцию датчика введен воспринимающий элемент (ВЭ), состоящий из сильфона и погружного элемента.

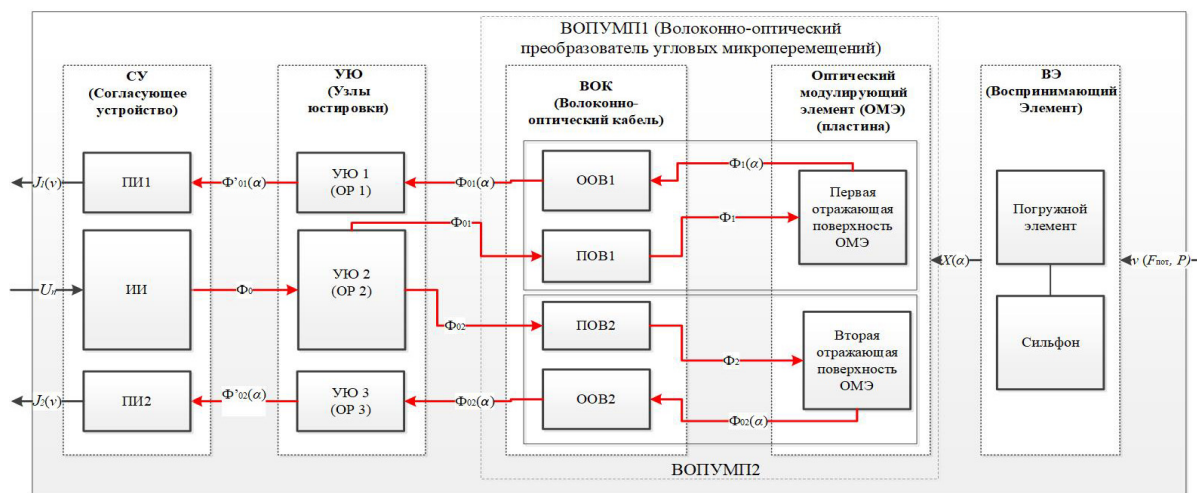


Рис. 1. Структурно-аналитическая модель дифференциального волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости: СУ – согласующее устройство; ПИ – приемник излучения; ИИ – источник излучения; УЮ – узел юстировки; ВОК – волоконно-оптический кабель; ОМЭ – оптико-модулирующий элемент; ВЭ – воспринимающий элемент; ВОПУМП – волоконно-оптический преобразователь угловых микроперемещений

Неотъемлемой частью ВОДСДЖ является волоконно-оптический кабель (ВОК), представляющий собой жгут, в его состав входят два подводящих (ПОВ) и два отводящих (ООВ) оптических волокна, расположенных в двух измерительных каналах (ИК). ВОК является передатчиком световых потоков от источника излучения (ИИ) в измерительную зону и обратно к приемникам излучения ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК соответственно. Приемные торцы ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК подстыкованы к ИИ с помощью ПОВ1 и ПОВ2. Оптические волокна измерительных каналов расположены с разных сторон относительно ОМЭ, при этом подводящие оптические волокна (ПОВ1) первого ИК расположены соосно с отводящими оптическими волокнами (ООВ2) второго ИК и, наоборот, ПОВ2 второго ИК расположены соосно с ООВ1 первого ИК.

При силовом воздействии жидкостного потока погружной элемент отклонится на некоторый угол  $\alpha$ , что в свою очередь повлечет отклонение на такой же угол отражателя с зеркальными поверхностями.

В разрабатываемых ВОДСДЖ унифицированными являются конструктивно-технологические решения ВОПУМП, ВЭ, ВОК. Для измерения скорости потока в разных условиях и с различными типами жидкости изменяется только конструкция погружного элемента.

Неправильное расположение волокна относительно источника или приемника излучения вызывает резкое снижение точности результатов измерений или может привести к неработоспособности датчика.

### Цель работы

Исследование и обоснование основных процедур юстировки ВОДСДЖ, снижающих погрешности датчика и разработка узлов его юстировки, обеспечивают повышение чувствительности средства измерения.

### Результаты

В структуре ВОДСДЖ присутствуют узлы юстировки УЮ1, УЮ2, УЮ3, от точности изготовления которых в процессе сборки зависят метрологические характеристики датчика.

Основной функцией процедуры юстировки является достижение верного взаиморасположения элементов волоконно-оптического датчика относительно друг друга, а также их правильное взаимодействие между собой.

Разработаны технология юстировки ВОДСДЖ и технология позиционирования оптических волокон относительно отражателя и относительно приемников и источника излучений.

Основными критериями правильного проведения процедуры юстировки ВОДСДЖ являются:

- 1) достижение высокой чувствительности преобразования оптического сигнала;
- 2) достижение максимальной линейности функции преобразования датчика.

Для повышения чувствительности преобразования оптического сигнала в конструкции датчика предусмотрены узлы юстировки, данные узлы показаны на структурной схеме (см. рис. 1), в разработанном ВОДСДЖ таких узла три.

Узел юстировки представляет собой элемент, который помогает зафиксировать положение оптического волокна относительно источника и приемника излучения.

На рис. 2 представлена юстировка оптических волокон в конструкции ВОДСДЖ, для ПОВ1 и ООВ2, аналогичным образом выглядит и юстировка оптических волокон ВОДСДЖ, расположенных на таком же расстоянии от отражателя, но с противоположной стороны. Процедуры юстировки оптического волокна первого и второго измерительных каналов аналогичны. При проведении такой процедуры в конструкцию датчика добавляются дополнительные элементы 1, которые вводятся в корпус 2 для фиксации оптического волокна (ОВ) 3.

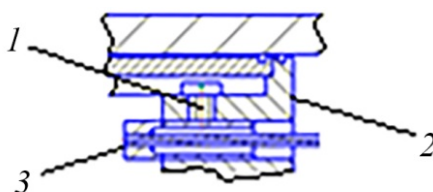


Рис. 2. Процедура юстировки оптического волокна в корпусе датчика:

1 – винт, для фиксации оптического волокна в корпусе датчика;  
2 – корпус датчика; 3 – оптическое волокно

За счет точной и жесткой фиксации ОВ в корпусе можно добиться повышения чувствительности преобразования оптических сигналов в 2 раза.

Оптико-модулирующий элемент необходимо располагать в зоне с равномерной освещенностью – это способствует проведению простых расчетов и графических построений, а также обеспечивает максимальную линейность выходной зависимости.

На рис. 3 представлен узел стыковки отражателя 1 и погружного элемента датчика 2. Отражатель закреплен на погружном элементе датчика с помощью резьбы, при этом для того, чтобы отражатель был стабильно закреплен на погружном элементе, предварительно резьбу можно обработать клеем или дополнительно закрепить его на поверхности с помощью сварки [6].

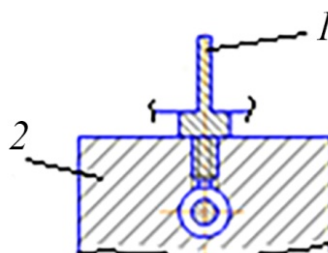


Рис. 3. Узел стыковки отражателя и погружного элемента ВОДСДЖ:

1 – отражатель; 2 – погружной элемент

Процедура юстировки заключается в следующем: при введении оптических волокон в корпус отражатель 1 должен быть размещен перпендикулярно ПОВ и ООВ, если после распространения излучения светового потока внутри оптического волокна наблюдаются большие потери отраженного светового потока, попадающего в ООВ, то с помощью резьбы положение отражателя 1 на погружном элементе 2 можно отрегулировать, тем самым задав более точное позиционирование относительно ОВ. При получении необходимой интенсивности отраженного светового потока положение отражателя можно дополнительно фиксировать с помощью клея или импульсной сварки.

Еще одним источником возникновения дополнительных погрешностей ВОДСДЖ может служить ОВ при его неправильном расположении и фиксации внутри ВОК: могут происходить изгибы, которые влияют на точность измерений датчика.

Для снижения дополнительных погрешностей, вызванных изгибами оптических волокон, разработан волоконно-оптический кабель для ВОДСДЖ. Дополнительные погрешности, вносимые изгибами такого кабеля, учтены и проанализированы в работе [3].

На оптическое волокно на протяжении всего срока службы оказывают воздействия вибрации, удары и т.д. В дифференциальной схеме преобразования данные факторы практически не оказывают влияния на результаты измерения, это достигается тем, что все волокна расположены в одном жгуте и испытывают одинаковые внешние воздействия [4].

На рис. 4 представлены основные способы позиционирования оптических волокон относительно светоизлучающей площади светодиода 3Л107Б, а также световой чувствительной площадки фотодиода КФДМ [3].

Все рассматриваемые варианты имеют свои достоинства по различным параметрам и свои недостатки, вызванные различными факторами.

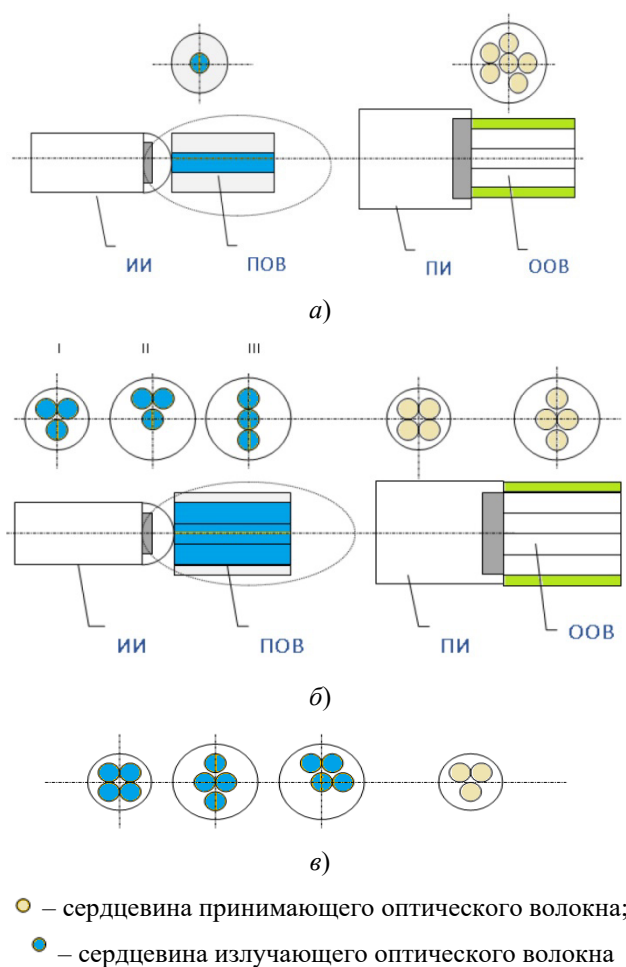


Рис. 4. Обоснование взаимного расположения оптического волокна относительно источника и приемника излучений: *а* – первый (I); *б* – второй (II); *в* – третий (III) варианты позиционирования оптических волокон относительно светоизлучающей площади светодиода

Первый вариант (I) наиболее простой в изготовлении, но недостатком такого подхода остаются существенные потери светового потока, что связано с наибольшей мощностью лучей, распространяющихся из центра ИИ, в данной зоне отсутствует POV.

В таком случае более предпочтительным окажется второй вариант (II), имеющий одно POV, расположенное по центру ИИ [3]. Дополнительные погрешности средства измерения вносит несимметричное расположение оптических волокон в жгуте.

При изготовлении ВОДСДЖ эффективным будет использование небольших отрезков технологических оптических волокон, с помощью которых возможно обеспечить более точное совпадение оптических осей источника излучения и центрального подводящего оптического волокна. К тому же такое расположение ОВ в жгуте позволяет определить угловое отклонение диаграммы направленности светодиода при настройке ВОДСДЖ по уровню выходного сигнала при обеспечении взаимного углового смещения жгута и источника излучения по отношению друг к другу и вдоль оптической оси.

При третьем варианте (III) ПОВ растянуты вдоль некоторой поперечной оси, предпочтение в применении получило угловое смещение диаграммы по излучению светового потока светодиодов, а не поперечное. Кроме того, данный жгут прост в изготовлении [3].

### Технология юстировки ИИ относительно ПОВ

На рис. 5 показан узел стыковки ПОВ и ИИ.

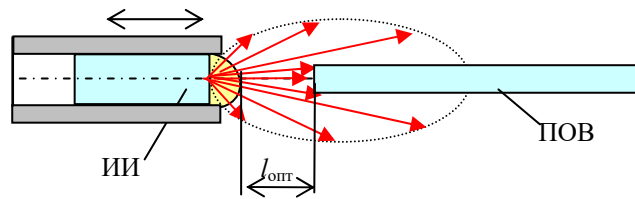


Рис. 5. Узел «ИИ – ПОВ»

Процедура юстировки ПОВ относительно ИИ следующая: ИИ приближается и удаляется относительно отверстия ПОВ, предназначенного для окончательной установки ОВ, относительно общего нерабочего торца ВОК.

При расчетно-конструктивном способе должно быть указано расчетное расстояние  $l_{\text{расч}}$  между ИИ и ПОВ, а также настраивается узел перемещения ИИ вдоль продольной оси узла «ИИ – ПОВ» и фиксируется экспериментально полученное расстояние  $l_{\text{эсп}}$ .

*Примечание.* При настройке подводящие оптические волокна остаются неподвижными, что, в свою очередь, связано с их полировкой до  $R_Z = 0,63$  [3].

С помощью оптического тестера фиксируется оптическая мощность  $W$  в последовательности:

1. Первоначально фиксируется  $W_{\text{max}}$  при радиусе изгиба  $R_{\text{изг}} = 0$ .

При  $W_{\text{max}}$  определяется положение ИИ в  $l_{\text{эсп}}$ .

2. На данном этапе поочередно изгибается ПОВ в трех местах: в середине, в месте соединения ВОК и ВОПУМП и в месте соединения ВОК и СУ.

Начинают изгибать ПОВ с угла 30 и далее по порядку: 60, 90, 120, 150, 180°.

На основании полученных результатов строится график, как показано рис. 6, в виде примера.

Выбирают зависимость, имеющую самую высокую чувствительность, при которой оптическая мощность  $W$  практически не меняется от изгиба оптического волокна на радиус  $R_{\text{изг}}$  (рис. 6).

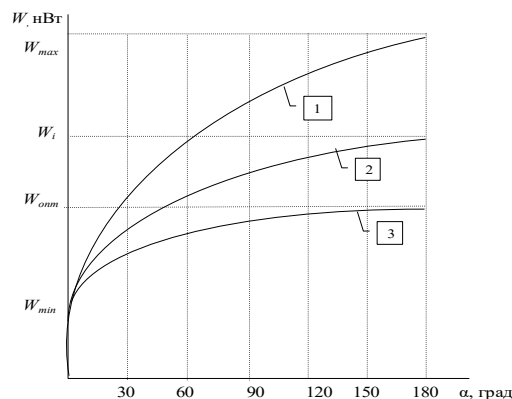


Рис. 6. Графики зависимостей  $W = f(\alpha)$  разных радиусах изгиба  $R_{\text{изг}}$

Проводится анализ полученных зависимостей:

*зависимость 1*

а) имеет наибольшее значение  $W$  при отсутствии изгибов;

б) одновременно при изменении  $R_{\text{изг}}$  резко меняется  $W$ ;

*зависимость 2*

а) значение  $W$  при наиболее характерных значениях изгибов (в процессе изготовления и эксплуатации не изменяется) [3–5];

б)  $W$  не на много меньше, по сравнению с зависимостью 1;

в) изгибы  $R_{\text{изг}}$  влияют на  $W$ ;

*зависимость 3 (предпочтительная)*

а) имеет наименьшее значение  $W$  при всех значениях  $\alpha$ ,

б) при этом изгибы  $R_{\text{изг}}$  не оказывают влияния на  $W$ .

Вывод: *зависимость 3* желательнее выбирать только в том случае, если  $W \geq W_{\text{крит}}$ , где  $W_{\text{крит}}$  – допустимое наименьшее значение начальной оптической мощности, при котором датчик осуществляет функционирование при воздействии внешних факторов. Это значение определяется до начала процедуры юстировки [3–5].

### Заключение

Разработанные процедуры юстировки позволили уменьшить в 2–3 раза дополнительные погрешности, вызванные воздействиями внешних факторов, в первую очередь от изменения температуры окружающей среды, приводящей к изменению мощности излучения источника излучения и интегральной токовой чувствительности приемника излучения.

Чувствительный элемент датчика обеспечивает требуемую чувствительность преобразования оптического сигнала, если качественно выполнить процедуры юстировки.

В статье рассмотрены основные критерии и технологии юстировки ПОВ относительно ИИ, узел стыковки отражателя и погружного элемента, процедура юстировки оптического волокна в корпусе датчика, способы снижения дополнительных погрешностей и улучшения метрологических характеристик ВОДСДЖ.

### Библиографический список

1. Бадеева, Е. А. Принципы повышения надежности волоконно-оптических кабелей для датчиков с открытым оптическим каналом / Е. А. Бадеева, Е. А. Полякова, А. В. Мотин // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении («Свет-2018»): материалы Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной молодежной школы, посвящ. 20-летию ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение» / под ред. проф. Т. И. Мурашкиной. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. – С. 23–27.
2. Шачнева, Е. А. Волоконно-оптический датчик расхода жидкостных сред для системы жизнеобеспечения космонавтов / Е. А. Шачнева, Т. И. Мурашкина, А. Ю. Удалов // Сборник конкурсных докладов XIII Всерос. молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. – Москва: ФГБУ науки Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2015. – С. 361–366.
3. Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники: дис. ... д-ра техн. наук / Бадеева Е. А. – Пенза, 2017. – 463 с.
4. Юрова, О. В. Вывод функции преобразования дифференциального волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений / О. В. Юрова, С. А. Бростилов, А. С. Щевелев, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы: сб. докл. XXX науч.-техн. конф. молодых специалистов (30–31 марта 2011 г.) / под ред. акад. Академии проблем качества РФ А. В. Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 45–51.
5. Щевелев, А. С. Технология дифференциального волоконно-оптического датчика виброускорения / А. С. Щевелев, О. В. Юрова, С. А. Бростилов, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы: сб. докл. XXX науч.-техн. конф. молодых специалистов (30–31 марта 2011 г.) / под ред. акад. Академии проблем качества РФ А. В. Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 61–67.

### References

1. Badeeva E. A., Polyakova E. A., Motin A. V. *Volonno-opticheskie, lazernye i nanotekhnologii v naukoemkom priborostroenii («Svet-2018»): materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy*

- molodezhnoy shkoly, posvyashch. 20-letiyu vedushchey nauchnoy shkoly Rossii «Volokonno-opticheskoe priborostroenie»* [Fiber-optical, laser and nanotechnologies in high-tech instrument engineering (Svet-2018): proceedings of the international scientific and technical conference. conf. with elements of a scientific youth school, vol. 20th anniversary of the leading scientific school of Russia "Fiber-optical instrumentation"]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 23–27. [In Russian]
2. Shachneva E. A., Murashkina T. I., Udalov A. Yu. *Sbornik konkursnykh dokladov KhIII Vseros. molodezhnogo Samarskogo konkursa-konferentsii nauchnykh rabot po optike i lazernoy fizike* [Collection of competitive reports XIII all-Russian Samara youth competition-conference of scientific papers on optics and laser physics]. Moscow: FGBU nauki Fizicheskiiy institut im. P. N. Lebedeva RAN, 2015, pp. 361–366. [In Russian]
  3. Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki: diss. d-ra tekhn. nauk* [Fiber-optic pressure sensors for information and measurement systems of rocket, space and aviation equipment: diss. ... doctor of technical sciences]. Penza, 2017, 463 p. [In Russian]
  4. Yurova O. V., Brostilov S. A., Shchevelev A. S., Murashkina T. I. *Datchiki i sistemy: sb. dokl. XXX nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (30–31 marta 2011 g.)* [Sensors and systems: sat. Dokl. XXX scientific and technical conf. of young specialists (March 30–31, 2011)]. Penza: OAO «NIIFI», 2011, pp. 45–51. [In Russian]
  5. Shchevelev A. S., Yurova O. V., Brostilov S. A., Murashkina T. I. *Datchiki i sistemy: sb. dokl. XXX nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (30–31 marta 2011 g.)* [Sensors and systems: sat. Dokl. XXX scientific and technical conf. of young specialists (March 30–31, 2011)]. Penza: OAO «NIIFI», 2011, pp. 61–67. [In Russian]

**Шачнева Елена Андреевна**

соискатель,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);  
 программист,  
 ООО «Норд-Пак»  
 (Россия, г. Пенза, ул. Рябова, 7)  
 E-mail: e\_shachnva@mail.ru

**Shachneva Elena Andreevna**

applicant,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);  
 programmer,  
 LLC "NORD-Pak"  
 (7 Ryabova street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Шачнева, Е. А. Способы юстировки волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости / Е. А. Шачнева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 65–72. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-8.