

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ УРОВНЕМЕР – СИГНАЛИЗАТОР ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ СРЕД¹

*Е. А. Бадеева, А. В. Бадеев, Н. А. Хасанишина,
Т. И. Мурашкина, Д. И. Серебряков*

THE FIBER AND OPTICAL LEVEL METER – THE PRESSURE INDICATOR LIQUID ENVIRONMENTS

*E. A. Badeeva, A. V. Badeev, N. A. Hasanshina,
T. I. Murashkina, D. I. Serebryakov*

Аннотация. Предмет. Уровнемеры-сигнализаторы имеют широкую сферу применения : они используются во флоте и судостроении, в пищевом, химическом и фармацевтическом производствах, в нефтегазовой, топливной, ракетно-технической и других промышленности. Развитие науки и техники идет по пути активного внедрения безопасных и надежных измерительных приборов на основе применения прорывных технологий. Целью данного исследования является создание новых конструктивных исполнений уровнемера-сигнализатора давления жидкостных сред, адаптированных для конкретных условий эксплуатации на основе свойств волоконной оптики для создания взрывобезопасных измерительных приборов. **Методы.** При разработке конструкции волоконно-оптического датчика-уровнемера использованы основы схмотехнического проектирования измерительных устройств, методы геометрической и волоконной оптики. **Результаты.** Разработаны модели и конструкции волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления, отличительной особенностью которого являются простота и надежность конструкции, точность измерения уровня или гидростатического давления любого типа жидкости в требуемых точках емкостей за счет введения упругого элемента, отделяющего чувствительный элемент от жидкости, герметично соединенный с одного торца с корпусом. **Выводы.** Новые технические решения уровнемеров-сигнализаторов давления на основе волоконно-оптического принципа действия позволят обеспечить безопасное, точное и надежное измерение уровня типов жидкостей, а также их гидростатического давления в разных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: волоконно-оптический уровнемер, сигнализатор, давление, полное внутреннее отражение, прозрачный стержень, жидкостная среда, принцип действия, конструкция, отражение.

Abstract. Background. Level gauges signaling devices have wide scope of application: they are used in the fleet and shipbuilding, in food, chemical and pharmaceutical productions, in oil and gas, fuel, rocket and technical and other industries. Development of science and technology goes on the way of active introduction of safe and reliable measuring devices on the basis of use of breakthrough technologies. Objective of this research is creation of new designs of the level gage pressure indicator of the liquid environments adapted for specific conditions of operation on the basis of properties of fiber optics for creation of explosion-proof measuring devices. **Methods.** When developing a design of the fiber-optical sensor level gage bases of circuitry design of measuring devices, methods of geo-

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФФИ, проект № 18-38-20045 «Исследование и формирование новых физико-технических и функциональных закономерностей преобразования сигналов в микро-оптико-механической системе волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом».

metrical and fiber optics are used. *Results.* Models and designs of the fiber-optical level gage pressure indicator which distinctive feature is simplicity and reliability of a design, accuracy of measurement of level or hydrostatic pressure of any type of liquid in the required points of capacities due to introduction of the elastic element separating the sensitive element from liquid which is hermetically connected from one end face to the case are developed. *Conclusions.* New technical solutions of level gages pressure indicators, on the basis of the fiber-optical principle of action will allow to provide safe, exact and reliable measurement of level of types of liquids and also their hydrostatic pressure in different service conditions.

Key words: fiber-optical level meter, signaling device, pressure, total internal reflection, transparent rod, liquid environment, operation principle, construction, reflection.

Введение

Уровнемеры – приборы для измерения и контроля уровня жидкостных сред в различных емкостях, хранилищах, резервуарах, например топлива в транспортном средстве, широко применяются в промышленности в составе информационно-измерительных систем (ИИС) [1–4]. При этом создание сигнализатора уровня любых типов жидкости, обеспечивающих безопасное применение без наличия электрических цепей на объектах морской, ракетно-космической и авиационной техники, нефтегазовой, топливной отрасли, в гидроэнергетике, пищевом, химическом и фармацевтическом производстве, судостроении является важной научно-технической задачей, решение которой возможно на пути создания сигнализаторов уровня жидкости с использованием волоконно-оптического принципа действия. Необходимо сконцентрировать усилия на разработке простого, надежного, универсального с точки зрения схемных и конструктивных решений волоконно-оптического уровнемера – сигнализатора давления жидкостных сред, принцип действия которого будет основан на использовании условия полного внутреннего отражения (ПВО) светового потока от границы раздела двух сред с разными коэффициентами преломления [5–9].

Материалы и методика

Проведен анализ известных технических решений уровнемеров жидкостных сред, на основе которого с учетом всех преимуществ и недостатков измерительных преобразователей, в том числе волоконно-оптических, разработаны конструкции волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления (ВОУ). Недостатками прототипов, которые были учтены при проектировании новых разрабатываемых конструктивных исполнений ВОУ, являются [2–4]:

- сложная технология изготовления с заданной точностью оптоволокна с изменяющимся вдоль оптической оси показателем преломления материала;
- возможная поломка оптоволокна при наличии внешних влияющих факторов, например вибраций, а также при заполнении резервуара жидкостью под большим напором [2];
- невозможность измерения уровня непрозрачных жидкостей, например нефти, так как поверхность чувствительного элемента – прозрачного стержня с шаровым сегментом постепенно покрывается пленкой, препятствующей реализации основного принципа действия [3, 4];
- не могут быть использованы как сигнализаторы гидростатического давления [1–4].

Авторами с учетом перечисленных недостатков разработаны новые конструкции ВОУ, принцип действия которых основан на нарушении условия ПВО световых лучей, проходящих по прозрачному стержню волоконно-оптического измерительного преобразователя, при изменении коэффициентов преломления сред в зоне контакта стержня с элементами, изменяющими свое положение под воздействием гидростатического давления жидкости, уровень или давление которой измеряется.

Результаты и обсуждение

Конструкция волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления. Один измерительный канал предлагаемого ВОУ содержит последовательно установленные и оптически согласованные источник излучения 1, например полупроводниковый излучающий светодиод, подводящее (ПОВ) 2 и отводящее (ООВ) 3 оптические волокна, чувствительный элемент (оптический стержень) 4, корпус 5, упругий элемент 6, приемник излучения 7, например фотодиод (рис. 1).

Чувствительный элемент 4 выполнен в виде стержня из оптически прозрачного материала, например кварцевого стекла. Цилиндрическая часть чувствительного элемента 4 закреплена в корпусе 5 с помощью соединительного состава 8, при этом шаровой сегмент выступает за пределы корпуса 5 на значение, большее или равное радиусу шарового сегмента R .

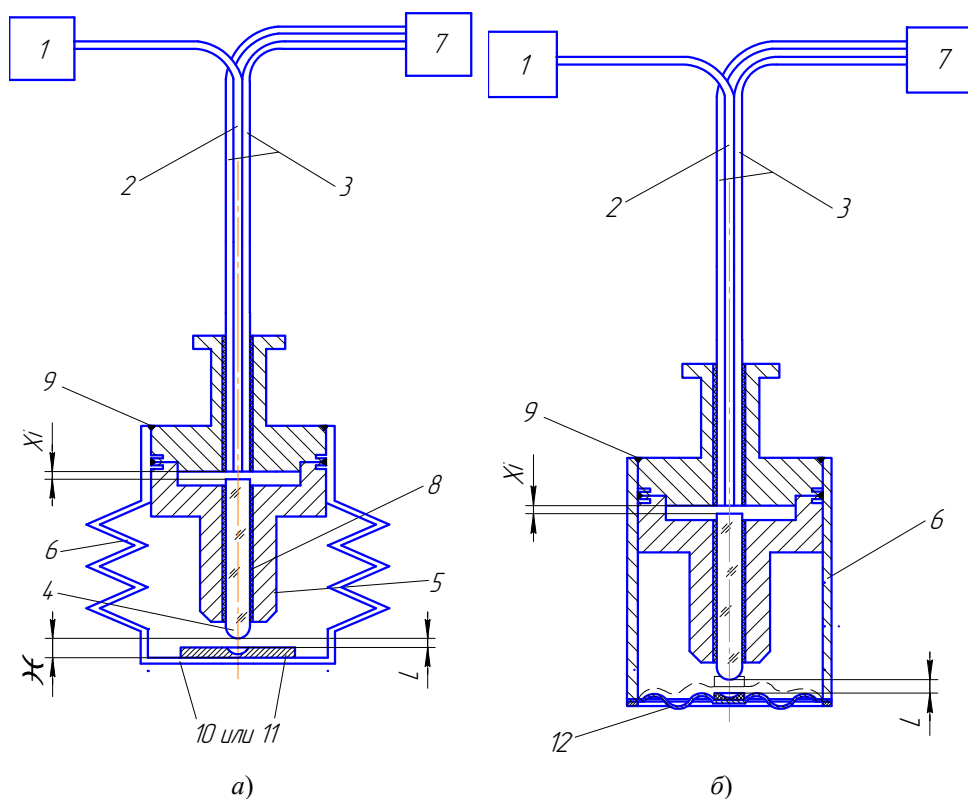


Рис. 1. Конструктивное исполнение волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления

Упругий элемент 6, отделяющий оптический стержень 4 от жидкости (сохраняет поверхность сегмента прозрачного стержня 4 от появления пленки при контакте с разными жидкостями), герметично крепится с одного торца на корпусе 5 (например с помощью сварки по контуру 9) таким образом, чтобы продольная ось его совпадала с продольной осью стержня 4, при этом внутренний диаметр упругого элемента превышает диаметр стержня 4. Другой торец упругого элемента глухой.

Расстояние X_i между общим торцом оптических волокон 2, 3 и торцом чувствительного элемента 4 приблизительно равно 0...0,01 мм.

Возможны варианты исполнения упругого элемента 6:

1) упругий элемент выполнен в виде сильфона, поверхность 10 глухого торца которого, обращенная к стержню 4, выполнена поглощающей и расположена относительно рабочей точки стержня на расстоянии, меньшем или равном максимальному сжатию сильфона (рис. 1,а);

2) упругий элемент выполнен в виде сильфона, на поверхности 10 глухого торца которого расположена пластина 11, материал которой имеет коэффициент преломления, при выполнении условия (1), а поверхность его, обращенная к стержню, расположена относительно рабочей точки стержня на расстоянии, меньшем или равном максимальному сжатию сильфона 6 (см. рис. 1,а):

$$n_0 < n_3 < n_1, \quad (1)$$

где n_0 , n_3 , n_1 – показатели преломления окружающей газовой среды около стержня, пластины и стержня соответственно;

3) глухой торец элемента 6 выполнен в виде мембраны 12, поверхность которой, обращенная к стержню, выполнена поглощающей и расположена относительно рабочей точки стержня на расстоянии, меньшем или равном максимальному прогибу мембраны (рис. 1,б);

4) глухой торец элемента 6 выполнен в виде мембраны 12, материал которой имеет коэффициент преломления, определяемый условием (2), поверхность которой, обращенная к стержню, расположена относительно рабочей точки стержня на расстоянии, меньшем или равном максимальному прогибу мембраны:

$$n_0 < n_m < n_1, \quad (2)$$

где n_0 , n_m , n_1 – показатели преломления окружающей газовой среды около стержня, мембраны и стержня соответственно.

В качестве элемента 11 может использоваться стеклянная пластина или каучуковая пластина.

Принцип действия волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления в составе информационно-измерительной системы. Принцип действия волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления в составе информационно-измерительной системы заключается в следующем. Излучение от источника 1 направляется по ПОВ 2 к стержню 4 (рис. 2). Поток излучения, излучаемый торцом ПОВ 2, падает на входной торец стержня 4, преломляется и распространяется по нему путем переотражения от цилиндрической поверхности до шарового сегмента.

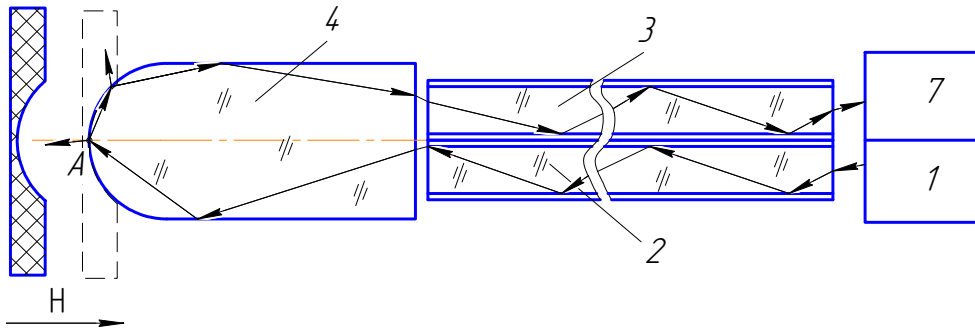


Рис. 2. Ход лучей в оптическом стержне

На рис. 3 приведена упрощенная схема предлагаемого многоточечного ВОУ, если регистрация наличия жидкости или сигнализация гидростатического давления осуществляется в нескольких точках емкости.

Если жидкость 13 в емкости 14 не дошла до глухого торца упругого элемента 6, то отсутствует контакт шарового сегмента стержня 4 с элементом 10 (или 11, или 12), при этом лучи света за счет выполнения условия полного внутреннего отражения внутри стержня 4 отражаются от поверхности стержня 4 и возвращаются обратно к входному торцу стержня 4, преломляются и выходят из стержня 4, падая на приемный торец ООВ 3. По ООВ 3 поток излучения распространяется до приемника излучения 7, где происходит его преобразование в электрический сигнал (например напряжение).

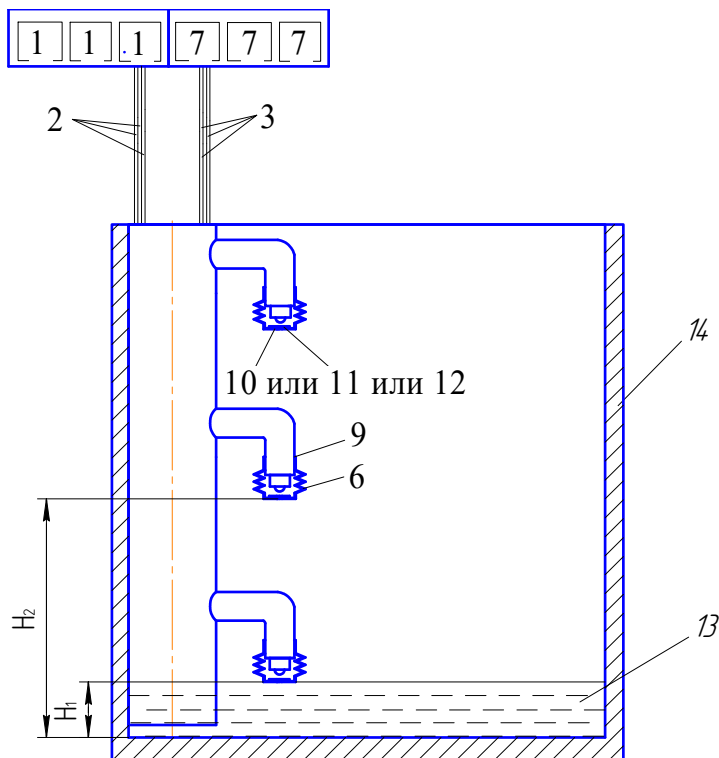


Рис. 3. Схема многоточечного ВОУ

Если жидкость 13 дошла до глухого торца упругого элемента 6, то за счет гидростатического давления сильфон сожмется (мембрана 12 прогнется), при этом поглощающая поверхность 10 глухого торца сильфона (или пластина 11, или поглощающая поверхность мембраны 12) контактирует с шаровым сегментом стержня 4. При этом происходит нарушение условия полного внутреннего отражения внутри стержня 4, и большая часть излучения выходит из стержня 4 (рис. 2, точка А), оставшаяся меньшая часть по ООВ 3 распространяется до приемника излучения 7.

Таким образом, наличие жидкости 13 в зоне измерения соответствует высокий уровень напряжения приемника излучения 7, отсутствию жидкости 13 – низкий уровень напряжения.

Аналогичным образом работают другие измерительные каналы волоконно-оптического уровнемера, если регистрация наличия жидкости осуществляется в нескольких точках емкости.

Повышение или понижение уровня жидкости в емкости 14 ведет к последовательному срабатыванию измерительных каналов. Сигналы с приемников излучения 7 в дальнейшем могут передаваться в систему обработки информации, которая может выдавать сигнал в виде последовательного дискретного повышения или понижения напряжения соответственно при повышении и понижении уровня жидкости или обрабатывать индивидуально сигналы с каждого измерительного канала.

Выводы

Предлагаемая новая конструкция волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления позволяет производить измерение уровня или гидростатического давления любого типа жидкости в требуемых точках емкостей, работоспособна в жестких условиях нефтяной отрасли (например в нефтехранилищах), ракетно-космической и авиационной техники и т.д. при воздействии вибраций, ударов, изменения температуры окружающей среды в диапазоне (-100...+150) °С (и более), обладает абсолютной искро- взрывопожаробезопасностью и не требует сложных технологических и измерительных операций при изготовлении. Разработанные конструктивно-технологические решения волоконно-оптического уровнемера-сигнализатора давления расширяют функциональные возможности существующих уровнемеров за счет возможности измерения уровня практически всех типов жидкостей, а также гидростатического давления данных жидкостей.

Библиографический список

1. ЗАО «Росприбор». Уровнемеры. – URL: <https://www.rospribor.com/questions/whatur/> (дата обращения 12.08.2018).
2. Волоконно-оптический уровнемер. – URL: <http://patents.su/6-1280329-volokonno-opticheskijj-urovnmemer.html> (дата обращения 12.08.2018).
3. Пат. 2297602 РФ. Волоконно-оптический сигнализатор уровня жидкости / Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И. – URL: <http://allpatents.ru/patent/2297602.html> (дата обращения 12.08.2018).
4. Пат. 2399887 РФ. Волоконно-оптический уровнемер и способ его изготовления / Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И. – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2399887> (дата обращения: 12.08.2018).

5. Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Бадеева Е. А. – Пенза, 2017. – 42 с.
6. Мурашкина, Т. И. Волоконно-оптические приборы и системы : Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета» / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. – СПб. : Политехника, 2018. – Ч. I. – 187 с.
7. Серебряков, Д. И. Волоконно-оптический сигнализатор уровня жидкости для информационно-измерительных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Серебряков Д. И. – Пенза, 2006. – 23 с.
8. Бадеева, Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники / Е. А. Бадеева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 103–114.
9. Murashkina, T. I. An optoelectronic fuel level sensor / T. I. Murashkina, E. A. Badeeva, A. V. Badeev, M. M. Savochkina // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, № 1. – P. 012103.

References

1. ЗАО «Rospribor». *Urovnemery* ["Rospribor". Level gauge]. Available at: <https://www.rospribor.com/questions/whatur/> (accessed Aug. 12, 2018).
2. *Volokonno-opticheskiy urovnemer* [Fiber optic level transmitter]. Available at: <http://patents.su/6-1280329-volokonno-opticheskijj-urovnemer.html> (accessed Aug. 12, 2018).
3. Pat. 2297602 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy signalizator urovnya zhidkosti* [Pat. 2297602 of the Russian Federation. Fiber-optic liquid level indicator]. Murashkina T. I., Serebryakov D. I. Available at: <http://allpatents.ru/patent/2297602.html> (accessed Aug. 12, 2018).
4. Pat. 2399887 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy urovnemer i sposob ego izgotovleniya* [Pat. 2399887 of the Russian Federation. Fiber-optic level gauge and method of its manufacturing]. Murashkina T. I., Serebryakov D. I. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2399887> (accessed Aug. 12, 2018).
5. Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Fiber-optic pressure sensors for information-measuring systems of rocket-space and aviation equipment : autoref. dis. ... dr. techn. sciences]. Penza, 2017, 42 p.
6. Murashkina T. I., Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta»* [Fiber-optic devices and systems: scientific developments of STC "Nanotechnologies of fiber-optic systems" of Penza state University]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2018, part I, 187 p.
7. Serebryakov D. I. *Volokonno-opticheskiy signalizator urovnya zhidkosti dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Fiber-optic liquid level indicator for information-measuring systems: autoref. dis. ... cand. tech. sciences]. Penza, 2006, 23 p.
8. Badeeva E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 4, pp. 103–114.
9. Murashkina T. I., Badeeva E. A., Badeev A. V., Savochkina M. M. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 803, no. 1, p. 012103.

Бадеева Елена Александровна
доктор технических наук, профессор,
кафедра бухгалтерского учета,
налогообложения и аудита,
главный научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии волоконно-
оптических систем»,
Пензенский государственный университет,
генеральный директор,
ООО «Специальные волоконно-
оптические измерительные системы»
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elen@mail.ru

Badeeva Elena Aleksandrovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of accounting,
taxation and auditing,
chief researcher,
STC «Nanotechnologies of fiber-
optical systems»,
Penza State University,
general director,
LLC «Special fiber-optical measuring
systems»
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бадеев Александр Валентинович
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии волоконно-
оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeyev@mail.ru

Badeev Alexander Valentinovich
candidate of technical sciences,
leading researcher,
STC «Nanotechnologies of fiber-
optical systems»,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Хасанишина Надежда Александровна
инженер-исследователь,
НТЦ «Нанотехнологии волоконно-
оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nadin.gloria@mail.ru

Hasanshina Nadezhda Aleksandrovna
research engineer,
STC «Nanotechnologies of fiber-
optical systems»,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мурашкина Татьяна Ивановна
доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения,
директор НТЦ «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina@mail.ru

Murashkina Tatyana Ivanovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of instrument making,
director of STC «Nanotechnologies
of fiber-optical systems»,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Серебряков Дмитрий Иванович
кандидат технических наук,
начальник технологической лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений,
старший научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии волоконно-
оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sdikoi@mail.ru

Serebryakov Dmitry Ivanovich
candidate of technical sciences,
chief of technological laboratory,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements,
senior research associate,
STC «Nanotechnologies
of fiber-optical systems»
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.7.06; 53.084; 53.087; 628.953.2

Бадеева, Е. А.

Волоконно-оптический уровнемер – сигнализатор давления жидкостных сред / Е. А. Бадеева, А. В. Бадеев, Н. А. Хасаншина, Т. И. Мурашкина, Д. И. Серебряков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 4 (28). – С. 113–121.