УДК 620.1.61

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ИСКРО-, ВЗРЫВО-, ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Назарова И.Т., Бадеева Е.А., Серебряков К.Д.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, e-mail: Uncate@yandex.ru

Проведен анализ существующих датчиков и систем измерения уровня топлива, выявлены их основные недостатки, учтенные в разработке новых волоконно-оптических систем измерения уровня жидкостных сред (ВОСИУЖС). Поставлена задача создания систем измерения уровня жидкости, в которых исключены недостатки существующих средств измерения уровня жидкости. Создание и внедрение на отечественных инженерно-технических объектах (ИТО) вертолетной и авиационной техники, АЭС, нефтегазодобывающей отрасли и других волоконно-оптических систем измерения уровня жидкостных сред (ВОСИУЖС) позволит решить эту задачу. Предложены новые способы измерения уровня жидкости, а также технологические процедуры изготовления высокопрочных волоконно-оптических средств измерения уровня жидкостных сред, функционирующих с высокой точностью. Разработана конструкция модернизированного МВОУ жидкостных сред, прозрачных для инфракрасного излучения, отличающаяся наличием нескольких ОЧЭ, смещенных относительно друг друга на требуемый уровень дискретности.

Ключевые слова: измерение уровня жидкости, волоконно-оптические датчики, технология изготовления, способ измерения уровня, метрологические характеристики

FIBER-OPTICAL SYSTEMS OF MEASUREMENT OF LEVEL OF SPARK-, EXPLOSION-, FIRE-DANGEROUS LIQUIDS

Nazarova I.T., Badeeva E.A., Serebrjakov K.D.

FBDEI HE «Penza State University», Penza, e-mail: Uncate@yandex.ru

The analysis of existing sensors and systems of measurement of level of fuel is carried out, their main shortcomings considered in development of new fiber-optical systems of measurement of level of liquid environments (FOSMLL) are revealed. There is a problem of creation of systems of measurement of level of liquid in which shortcomings of existing gages of level of liquid are excluded. Creation and introduction on the domestic technical objects of the helicopter and aircraft equipment, the nuclear power plant, oil and gas extraction branch, etc. fiber-optical systems of measurement of level of liquid environments will allow to solve this problem. New ways of measurement of level of liquid, and as technological procedures of production of high-strength fiber-optical gages of level of the liquid environments functioning with high precision are offered. The design of the modernized MFOL of liquid environments, transparent is developed for infrared radiation differing in existence of several OSE displaced relatively each other on the demanded discretization level.

Keywords: measurement of level of liquid, fiber-optical sensors, manufacturing techniques, way of measurement of level, metrological characteristics

Безопасное измерение уровня жидкости в условиях потенциальной искро-, взрыво-, пожарной опасности является сложной технической задачей. Особенно остро эта проблема встала в свете событий в Японии, когда для предотвращения более разрушительных последствий аварии на АЭС в городе Фукусима было отключено электричество и соответственно не работал ни один «электрический» датчик. В частности, не было никакой информации об уровне охлаждающей жидкости в реакторе.

На многих инженерно-технических объектах вертолетной и авиационной техники, АЭС, нефтегазодобывающей отрасли есть необходимость измерения уровня жидкости с погрешностью меньшей 0,1 мм, например: уровня топлива в условиях полета, в системах налива/слива топлива, учета нефтепродуктов в условиях воздействия сильных электромагнитных помех и повышенной искро-, взрыво-, пожароопасности.

Существующие датчики и системы измерения уровня топлива, основанные на таких физических принципах как емкостный, индуктивный, поплавковый, ультразвуковой и др., требуют в конструкции изделия дополнительных систем и контуров защиты от случайного проскакивания искры, так как для преобразования измерительной информации используют электрические сигналы. Это, в свою очередь, приводит к увеличению массы авиационной, ракетной и другой техники. В вертолетной индустрии до настоящего времени используются поплавковые уровнемеры, занимающие до 10% объема топливного бака, не позволяющие с высокой точностью выполнять измерения при наклоне бака относительно линии горизонта, а самое главное: механическая преобразующая система может выйти из строя при механических воздействиях.

Стоит задача создания систем измерения уровня жидкости, в которых исключены недостатки существующих средств измерения уровня жидкости. Создание и внедрение на отечественных инженерно-технических объектах (ИТО) вертолетной и авиационной техники, АЭС, нефтегазодобывающей отрасли и других волоконно-оптических

систем измерения уровня жидкостных сред (ВОСИУЖС) позволит решить эту задачу.

Сложность создания таких систем заключается в необходимости обеспечения надежной конструкции, которая в реальных условиях применения должна работать при воздействии температуры в диапазоне от минус 60 до 85 °С, вибраций до 100 g, а также под большим напором при заполнении емкости жидкостью (жидким топливом). Известные конструкции волоконно-оптических средств измерения не могут работать в таких условиях, так как возможна поломка оптических волокон.

Существенным недостатком известных технических решений ВОСИУЖС, построенных на принципе нарушения условия полного внутреннего отражения светового потока, получивших наибольшее распространение, является практическая невозможность измерения текущего уровня жидкостей, и в том числе непрозрачных жидкостей, создающих пленки на поверхности оптических чувствительных элементов.

Новые технологические приемы изготовления ВОСИУЖС позволят обеспечить безопасность, надежность, точность измерения, работоспособность системы в жестких условиях эксплуатации, а также невысокую себестоимость за счет применения новых технологических подходов, современной комплектующей базы, эффективных технических решений.

Проведенная математическая формализация процессов распределения светового потока в оптических трактах волоконно-оптических сигнализаторов (ВОС), дифференциальных волоконно-оптических датчиках гидростатического давления (ВОДГД) аттенюаторного типа, входящих в состав разработанных многоточечных волоконно-оптических уровнемеров (МВОУ), позволила определить условия наиболее эффективного согласования и взаимного расположения элементов оптической системы [1, 2].

При изготовлении ВОС встает вопрос выбора конструктивных параметров оптического чувствительного элемента (ОЧЭ) из оптически прозрачного материала, например, из кварцевого стекла, для которого выполняется условие: $n_0 < n < n_1$, где $n_0 < n < n_1$ – показатели преломления окружающей среды, жидкости и стержня соответственно: длины L ОЧЭ и радиуса R шарового сегмента ОЧЭ, обеспечивающих максимальный перепад оптического сигнала (в случае контакта с жидкостью и отсутствии контакта), минимальные информативные потери в зоне измерения и попадание лучей от подводящего ОВ в отводящие ОВ при отсутствии контакта ОЧЭ с жидкостью. Определено выражение для определения соотношения L и R :

$$|L| = \frac{-R\cos(90-\alpha)\sqrt{tg^2 \arcsin\left(\frac{\sin\Theta_{NA} n_0}{n_1}\right)+1} + \frac{d_c}{2}}{tg \arcsin\left(\frac{\sin\Theta_{NA} n_0}{n_1}\right)},$$

где Θ_{NA} – апертурный угол ОВ; d_c, d_o – диаметры сердцевины и оболочки ОВ соответственно; $d_{ов} \le R \le 1{,}5\, d_{ов}$, α – угол отражения от шарового сегмента: $\arcsin n_0/n < \alpha < \arcsin n/n_1$. Определена функция преобразования оптического канала ВОДГД :

$$\Phi_1(Z) = \frac{\Phi_0}{2\pi r_C (2d_{OB} + r_C)} \sum_{i=1}^{n/2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{r_C^2}{2}\left[\left(\frac{\pi}{90} - \arcsin\frac{a_i}{2r_C}\right) - \sin\left(2\arcsin\frac{a_i}{2r_C}\right)\right] + \\ + \frac{R_{СП}^2}{2}\left[\left(\frac{\pi}{90} - \arcsin\frac{a_i}{2R_{СП}}\right) - \sin\left(2\arcsin\frac{a_i}{2R_{СП}}\right)\right] \end{array} \right\},$$

где Φ_0 – начальный световой поток на выходе подводящего ОВ; $i = 1, ..., n$, где n – количество отводящих ОВ; r_c – радиус сердцевины ОВ; $R_{СП}=Ltg\Theta_{NA}$, где L – расстояние между излучающим торцом подводящих ОВ и плоскостью, в которой расположены приемные торцы отводящих ОВ; Q_{NA} – апертурный угол ОВ;

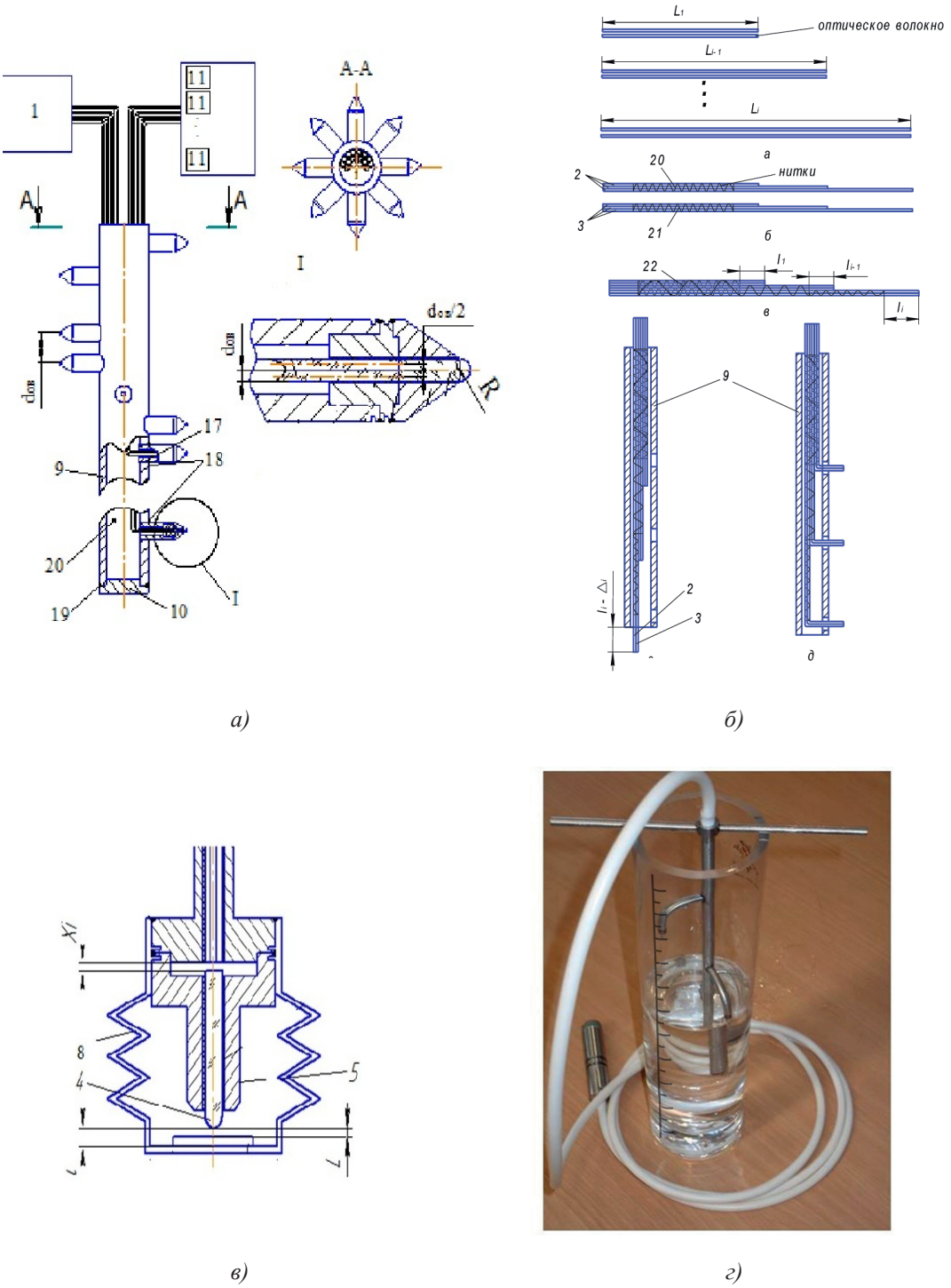
$$a_i = \sqrt{r_C^2 - \left(\frac{D_i}{2} + \frac{r_C^2 - R_{СП}^2}{2D_i}\right)^2},$$

где

$$D_i(I) = \sqrt{(R_{СП} + z_i)^2 + R_{СП}^2 - 2R_{СП}(R_{СП} + z_i)\cos\frac{360^\circ}{n}}.$$

Доказано, что вид функции преобразования ВОДГД с дифференциальным аттенюатором определяется следующими параметрами ОВ: r_C, d_{OB}, Θ_{NA} количеством n отводящих ОВ, расстоянием L между подводящими и отводящими ОВ.

Разработана конструкция модернизированного МВОУ жидкостных сред, прозрачных для инфракрасного излучения, отличающаяся наличием нескольких ОЧЭ, смещенных относительно друг друга на требуемый уровень дискретности (рис. 1, *а*) [3, 4].



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 1. а – конструкция, б – технологический процесс изготовления модернизированного МВОУ; в – модернизированный ВОС с герметичным упругим элементом; г – фото модернизированного МВОУ

Для измерения уровня непрозрачных жидкостей, например, нефти, когда возникает проблема нарушения прозрачности ОЧЭ: поверхность сегмента прозрачного стержня постепенно покрывается пленкой, препятствующей реализации принципа действия, основанного на нарушении условия полного внутреннего отражения, предложено ввести в конструкцию ВОС герметичный упругий элемент, отделяющий ОЧЭ от жидкости. Упругий элемент может быть выполнен в виде мембраны или сильфона, поверхность глухого торца которого обращена к стержню ОЧЭ и расположена с малым зазором относительно крайней точки стержня (см. рис. 1, *в*).

Так как дискретный принцип измерения разработанной ВОСИУЖС не обеспечивает требуемую точность измерения уровня жидкости, то предложено для непрерывного измерения уровня жидкости на нескольких уровнях емкости размещать ВОДГД, например, если емкость имеет высоту 20 м, то ее по высоте можно разделить на 10 участков по 2 м и соответственно на каждом уровне установить ВОДГД, диапазон измерения которого соответствует данному участку. При этом ВОДГД устанавливается на ту же трубу, на которой установлены ВОС (рис. 2).

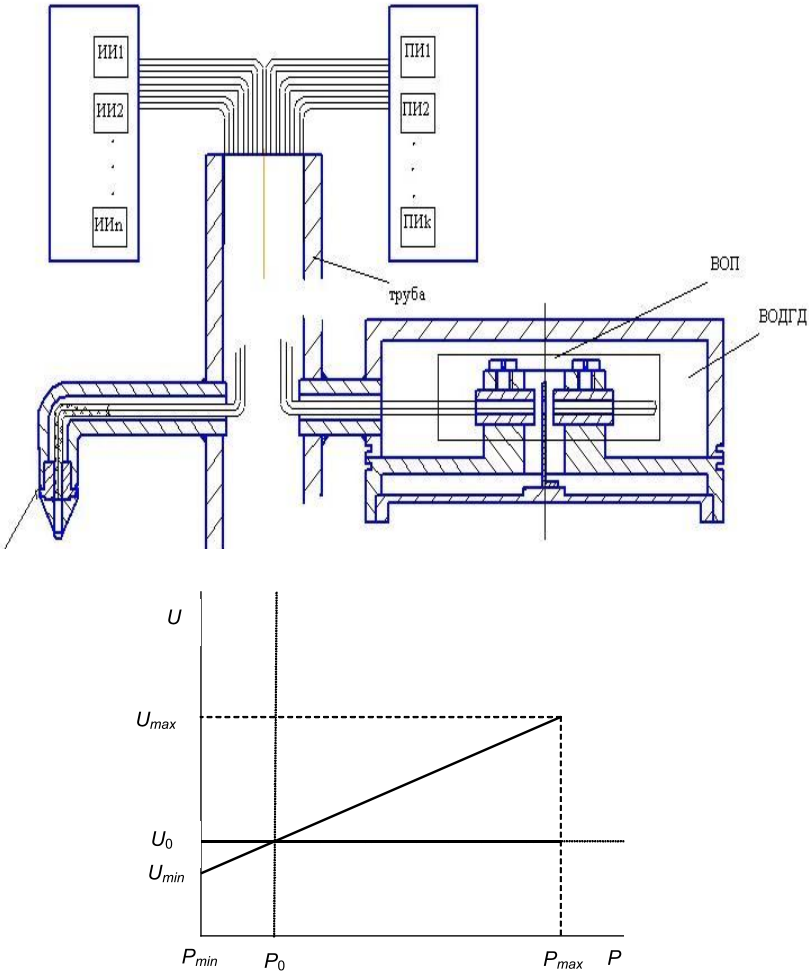


Рис. 2. К пояснению процедуры калибровки МВОУ

Для повышения точности измерения за счет уменьшения аддитивной составляющей погрешности измерения из-за технологической погрешности установки ВОДГД в емкости, предлагается ВОС с открытым ОЧЭ (см. рис. 1, *а*) использовать только в процессе калибровки перед началом эксплуатации системы, а для калибровки отдельных участков в процессе эксплуатации применять модернизированные защищенные ОЧЭ (см. рис. 1, *в*).

Новая ВОСИУЖС позволяет производить измерения уровня жидкости с любым коэффициентом преломления в несколь-

ких требуемых точках емкостей, работоспособна в жестких условиях, обладает абсолютной искро-, взрыво-, пожаробезопасностью и не требует сложных технологических и измерительных операций при изготовлении.

Список литературы

1. Пивкин А.Г., Мурашкина Т.И. Волоконно-оптические датчики давления аттенюаторного типа для ракетной техники: *Монография.* – Пенза: изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 150 с.

2. Расчет параметров чувствительного элемента ВОСИУЖС / И.Т. Назарова, Д.И. Серебряков, К.Д. Серебряков, Е.А. Бадеева, Т.И. Мурашкина //Современная электроника. – 2012. – №8. – С. 50–51.

3. Модернизированная ВОСИУЖС / Т.И. Мурашкина, И.Т. Назарова, Д.И. Серебряков, К.Д.Серебряков, Д.В. Митин // Современная электроника. – 2014. – №5. – С. 44–45.

4. Заявка на изобретение 2014111955 от 27.03.2014 Волоконно-оптический уровнемер и способ его изготовления// Т.И. Мурашкина, И.Т. Назарова, Д.И. Серебряков, А.Г. Пивкин, Е.А. Бадеева.

5. Новый способ измерения уровня топлива в условиях полета / И.Т. Назарова, Д.И. Серебряков, К.Д. Серебряков, Д.В. Митин // СВЕТ-2013 : сб. науч.-техн. конф. в рамках Всерос. науч. шк. (г. Пенза, 1–3 октября 2013 г.). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – С. 28–30.

References

1. Pivkin A.G., Murashkina T.I. fiber-optical sensors of pressure of attenyuatorny type for rocketry: Monograph. Penza: publishing house Penz. the state. un-that, 2005. 150 p.

2. Calculation of parameters of the VOSIUZhS / sensitive element. T.I. Nazarova, D.I. Serebryakov, K.D. Serebryakov, E.A. Badeeva, T.I. Murashkina//Modern electronics. 2012. no. 8. pp. 50–51.

3. Modernized FOSLLM / T.I. Murashkina, I.T. Nazarova, D.I. Serebryakov, K.D. Serebryakov, D.V. Mitin // Modern electronics. 2014. no. 5. pp. 44–45.

4. Demand for the invention 2014111955 of 27.03.2014 Fiber-optical level gage and way of its production // T.I. Murashkina, I.T. Nazarov, D.I. Serebryakov, A.G. Pivkin, E.A. Badeeva.

5. New way of measurement of level of fuel in flight conditions / I.T. Nazarova, D.I. Serebryakov, K.D. Serebryakov, D.V. Mitin // SVET-2013 : sb. nauch.-tehn. konf. within Vseros. науч. шк. (Penza, on October 1–3, 2013). Penza: PGU publishing house, 2013. pp. 28–30.

Рецензенты:

Мурашкина Т.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборостроение», Пензенский государственный университет, г. Пенза;

Васильев В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение», Пензенский государственный университет, г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 08.09.2014.