

10. *Zatsiorsky V.* Contemporary Problems in Biomechanics. – Massachusetts: CRC Press, 1990. 143 p.
11. *Соя Д.М., Жук Д.М.* Моделирование двигательного аппарата спортсмена // Инженерный вестник. Издатель: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 7.
12. *Шатаева Е.В.* К вопросу оценки состояния опорно-двигательного аппарата человека с эндопротезом тазобедренного сустава // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2003. № 4. С. 52-55.
13. *Baldwin J.L., House C.K.* Anatomic dimensions of the patella measured during total knee arthroplasty // The Journal of Arthroplasty. 2005. № 20. PP. 250-257.
14. *Gray H.* Anatomy of the human body. – New York: Bartleby, 2000. 1576 p.
15. *Hayot C.* Analyse biomécanique 3D de la marche humaine: comparaison des modèles mécaniques: thèse de doctorat / Дис. канд... наук (PhD). Poitiers: Université de Poitiers, 2010. 214 p.
16. *Vicon Motion Systems.* Technical Report / Motion Analysis & Instrumented Treadmill Laboratories, Department of Physical Therapy, University of Delaware, 2002.
17. *Viel E.* La marche humaine, la course et le saut. – Paris: Masson, 2000. 268 p.
18. *Levinger P., Lai D.T.H., Begg R., Menz H., Feller J., Webster K.* Fourier analysis of tibia acceleration in subjects with knee osteoarthritis: Preliminary results / Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. 2008. PP. 315-320.

Констанс Алис Мессаж,
студентка,
Жозель Валентин Штадельманн,
канд. техн. наук, доцент,
Игорь Николаевич Спиридонов,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой,
кафедра «Биомедицинские технические системы»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: joel.stadelmann@gmail.com

Т.И. Мурашкина, Т.В. Истомина, Е.А. Бадеева, Д.И. Серебряков, О.В. Юрова, А.Ю. Удалов, Е.А. Шачнева

Измерение расхода жидкости в системах жизнеобеспечения космонавтов

Аннотация

В статье предложены способ и устройство для воспроизведения и измерения параметров жидкостных потоков (объема, скорости, расхода), необходимых при исследованиях, юстировке и настройке оптической системы волоконно-оптических датчиков расхода, применяемых в системах жизнеобеспечения космонавтов.

Введение

Космическая медицина в своем историческом развитии прошла путь от моделирования факторов космического полета в лабораторных условиях и при полетах животных на ракетах и спутниках до исследований, связанных с длительными полетами орбитальных станций и полетами международных экипажей. Основные задачи на ранних стадиях развития космической медицины были направлены на изучение вопроса о принципиальной возможности полета человека в космос и решение проблем создания систем, обеспечивающих пребывание человека в кабине космического корабля во время орбитального полета [1].

В необычных условиях космического полета (вакуум, лучистый теплообмен, ионизирующие излучения) человек должен находиться в замкнутом герметичном отсеке космического летательного аппарата. В обитаемом отсеке необходимо создать условия для обеспечения нормального существования и работы человека. Эти условия необходимо поддерживать в течение всего полета, подавая в отсек вещества, потребляемые человеком, и удаляя продукты его жизнедеятельности. Бортовые системы космического летательного аппарата (КЛА), которые решают эти задачи, называются *системами жизнеобеспечения* – СЖО (рис. 1) [2].

В настоящее время речь идет о совершенствовании систем жизнеобеспечения космонавтов в условиях все более жесткого

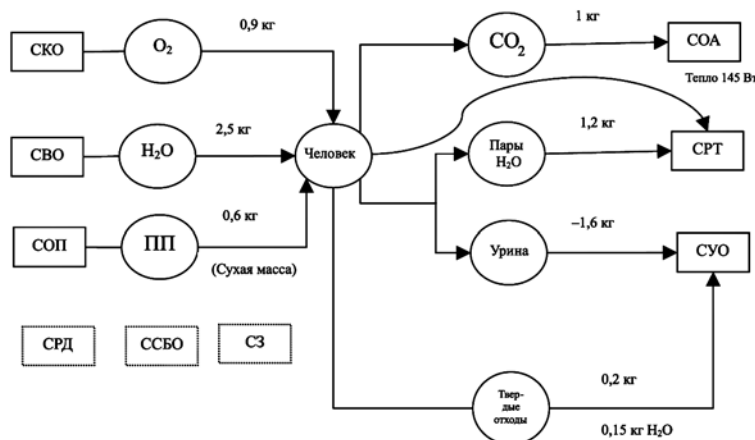


Рис. 1. Массообмен и энергообмен организма человека с окружающей средой и состав системы жизнеобеспечения (СЖО) [2]: СКО – система кислородообеспечения; СВО – система водообеспечения; СОП – средства обеспечения питанием; ПП – продукты питания; СОА – система очистки атмосферы; СРТ – средства регулирования температуры и влажности воздуха; СУО – система удаления отходов; СРД – средства регулирования давления в отсеке; ССБО – средства санитарно-бытового обеспечения; СЗ – средства индивидуальной защиты (скафандры)

воздействия внешних факторов на их организм в длительных полетах.

В состав любой составляющей СЖО входят средства измерений различных физических величин, как правило «электрического» типа. Для исключения влияния на организм космонавта электромагнитного воздействия компонентов СЖО, а также с целью снижения их веса на борту КЛА, в последнее время рассматриваются вопросы применения волоконно-оптических систем различного назначения, в том числе измерительных систем [3].

Как видно из рис. 1, практически все системы СЖО тем или иным образом связаны с необходимостью измерения параметров жидкостных сред, соответственно стоит задача разработки волоконно-оптических средств измерения расхода (объема, скорости) различных типов жидкостей в СЖО.

В настоящее время существует множество способов и установок для воспроизведения и измерения расхода жидкости [4]. Но основной их недостаток заключается в сложности технической реализации и неоправданно высокой сложности проведения экспериментов.

Авторы предлагают новые способы и устройства для измерения и воспроизведения расхода жидкости, основанные на использовании элементов волоконной оптики.

Материалы и методы

Предлагаемый способ воспроизведения параметров жидкостных потоков заключается в том, что через трубу известного поперечного сечения пропускают жидкостный поток, параметры которого определяют по изменению уровня жидкости в емкостях на входе или выходе трубопровода за фиксированный период времени.

На рис. 2 представлена упрощенная конструктивная схема устройства для реализации предлагаемого способа воспроизведения и измерения параметров жидкостных сред.

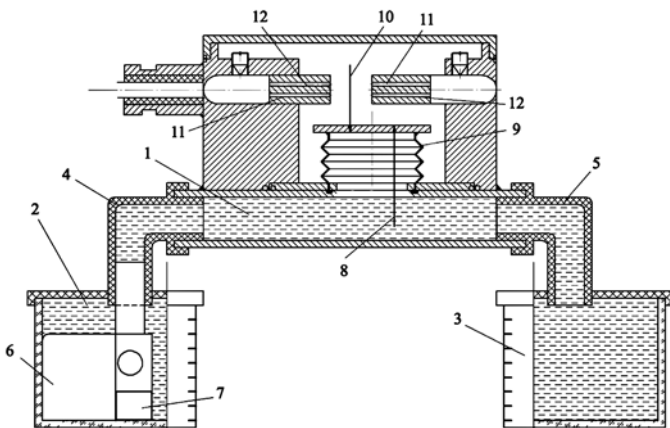


Рис. 2. Упрощенная конструктивная схема устройства для воспроизведения и измерения параметров жидкостных сред

Устройство включает в себя следующие элементы для воспроизведения параметров перекачиваемой жидкости: трубопровод 1, через который протекает жидкость; емкость 2 со шкалой, отградуированной по высоте в значениях уровня жидкости; емкость для слива 3 также со шкалой, отградуированной по высоте в значениях уровня жидкости; шланги 4 и 5; насос 6; таймер 7, соединенный с пусковым устройством насоса. Насос 6 размещен на дне емкости 2 (желательно прозрачной) с жидкостью, уровень которой определяется по шкале. Концы шлангов 4 и 5 опущены в емкости 2 и 3 соответственно. Другие концы шлангов 4 и 5 герметично соединены с разных сторон с трубопроводом 1.

Устройство включает в себя следующие элементы для измерения параметров жидкостного потока: воспринимающий элемент 8, один конец которого закреплен на глухом торце внутри сильфона 9, а другой, свободный, конец расположен в трубопроводе 1 в зоне протекания жидкости; пластину 10 с двумя зеркальными поверхностями, один конец которой закреплен на глухом торце снаружи сильфона 9, а другой, сво-

бодный, конец расположен на расчетном расстоянии относительно подводных (ПОВ) 11 и отводящих (ООВ) 12 оптических волокон [5] первого и второго измерительных каналов (ИК) (см. рис. 2). Воспринимающий элемент 8 и пластина 10 смещены относительно оси сильфона 9 на некоторые расстояния в противоположных направлениях. Сильфон 9 герметично закреплен на трубопроводе 1.

Приемные торцы ПОВ 1 и ПОВ 2 первого и второго ИК подстыкованы к одному и тому же источнику излучений (ИИ), например к инфракрасному светодиоду (рис. 3) [6].

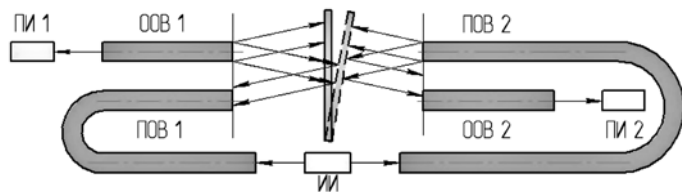


Рис. 3. Соединения ПОВ и ООВ с источником и приемниками излучения

Излучающие торцы ООВ 1 и ООВ 2 первого и второго ИК подстыкованы к первому (ПИ 1) и второму (ПИ 2) приемникам излучения первого и второго ИК соответственно.

Излучающие торцы ПОВ 1 и ПОВ 2 первого и второго ИК расположены соосно приемным торцам ООВ 2 и ООВ 1 соответственно с разных сторон пластины 10 с зеркальными поверхностями.

Устройство работает следующим образом: при включении насоса 6 таймер начинает отсчет времени с момента времени $t_1 = 0$, при выключении прекращает работу в момент времени t_2 , соответственно время работы определится как $\Delta t = t_2 - t_1$. Перед началом измерений фиксируется уровень H_1 жидкости в емкости 2. В конце измерений в момент времени t_2 фиксируется уровень H_2 . Скорость потока в трубопроводе 1 определится по формуле

$$v_{nom} = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Поток с силой F будет давить на воспринимающий элемент 8:

$$F = \rho h \frac{\pi d^2}{8} \left(\frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \right)^2, \quad (2)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода.

Соответственно давление, действующее на воспринимающий элемент, будет

$$P = \rho h k \frac{\pi d^2}{S_{БЭ} 8} \left(\frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \right)^2, \quad (3)$$

где k – коэффициент, характеризующий конфигурацию воспринимающего элемента; $S_{БЭ}$ – площадь поверхности воспринимающего элемента, на которую давит поток.

Под действием давления жидкостного потока воспринимающий элемент 8 отклонится на некоторый угол α , соответственно на такой же угол отклонится пластина 10 с зеркальными поверхностями (рис. 3 и 4).

Световые потоки Φ_{01} и Φ_{02} от ИИ по ПОВ1 и ПОВ2 направляются в зону измерения к первой и второй отражающим поверхностям пластины 10 соответственно. При изменении угла α изменяются интенсивности отраженных световых потоков $\Phi_1(\alpha)$ и $\Phi_2(\alpha)$ соответственно.

По ООВ1 и ООВ2 световые потоки $\Phi_1(\alpha)$ и $\Phi_2(\alpha)$ поступают на ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК соответственно, где преобразуются в электрические сигналы $I_1(\alpha)$ и $I_2(\alpha)$.

Электрические сигналы на выходе ПИ1 и ПИ2 пропорциональны интенсивности световых потоков, поступающих на них из зоны измерения по ООВ1 и ООВ2 соответственно:

$$I(\alpha)_{1\text{канала}} \sim \Phi(\alpha)_{1\text{канала}}; \quad I(\alpha)_{2\text{канала}} \sim \Phi(\alpha)_{2\text{канала}}$$

Для улучшения точностных характеристик устройства измерения параметров жидкостного потока целесообразно сфор-

мировать отношение разности сигналов на выходе каналов к их сумме:

$$\frac{I(\alpha)_{1\text{канала}} - I(\alpha)_{2\text{канала}}}{I(\alpha)_{1\text{канала}} + I(\alpha)_{2\text{канала}}}$$

В этом случае наблюдается удвоение чувствительности преобразования, снижается влияние на точность измерения неинформативных изгибов оптических волокон, изменения мощности излучения ИИ и чувствительности ПИ, так как данные факторы вызывают пропорциональные изменения сигналов в каналах, которые не влекут изменения отношения сигналов.

На этапе юстировки оптической системы предлагаемого устройства необходимо определить конструктивные параметры, при которых функция преобразования оптической системы будет линейной, а также будет высокой чувствительность преобразования оптического сигнала.

Функция преобразования оптической системы одного ИК $\Phi(\alpha)$ имеет вид

$$\Phi(\alpha) = K(\alpha)\Phi_0, \quad (1)$$

где $K(\alpha)$ – коэффициенты передачи оптического тракта «ПОВ – пластина – ООВ»; Φ_0 – световой поток, введенный в зону расположения пластины.

Очевидно, что при $\Phi_0 = \text{const}$ вид функции преобразования $\Phi(\alpha)$ будет определяться видом функции передачи оптического тракта, т. е. коэффициента $K(\alpha)$, в диапазоне измерения.

Рассмотрим, как можно изменять вид функции преобразования $K = f(\alpha)$ с учетом геометрических построений, показанных на рис. 4. Имеем

$$K(\alpha) = \rho \frac{\sum_{i=1}^k S_{ПП}}{S_{\text{Э}}}, \quad (2)$$

где ρ – коэффициент отражения зеркальной поверхности; $\sum_{i=1}^k S_{ПП}$ – суммарная площадь приемных торцов ООВ, освещенная отраженным от зеркальной поверхности световым потоком; $i = 1 \dots k$ – количество ООВ; $S_{\text{Э}}$ – площадь эллипсоидной зоны в плоскости приемных торцов ООВ.

$$S_{ПП} = S_1 + S_2. \quad (3)$$

Площади S_1 и S_2 представляют собой секторы, образованные взаимным пересечением окружности радиусом, равным радиусу r_c сердцевины ООВ, и эллипса, образованного отраженными лучами в плоскости общего торца ОВ, большая полуось которого – $R_{\text{Э}}$, а малая – $r_{\text{Э}}$, и хорды АВ длиной a .

С учетом геометрических построений (см. рис. 4) определено:

$$S_{\text{np}} = \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \frac{(r_c \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} \right) \right], \quad (4)$$

где

$$b = AB = 2 \sqrt{r_c^2 - \left[\frac{D}{2} + \frac{(r_c \cos \alpha)^2 - (R \cos \alpha)^2}{2D} \right]^2},$$

где $D = OO'$;

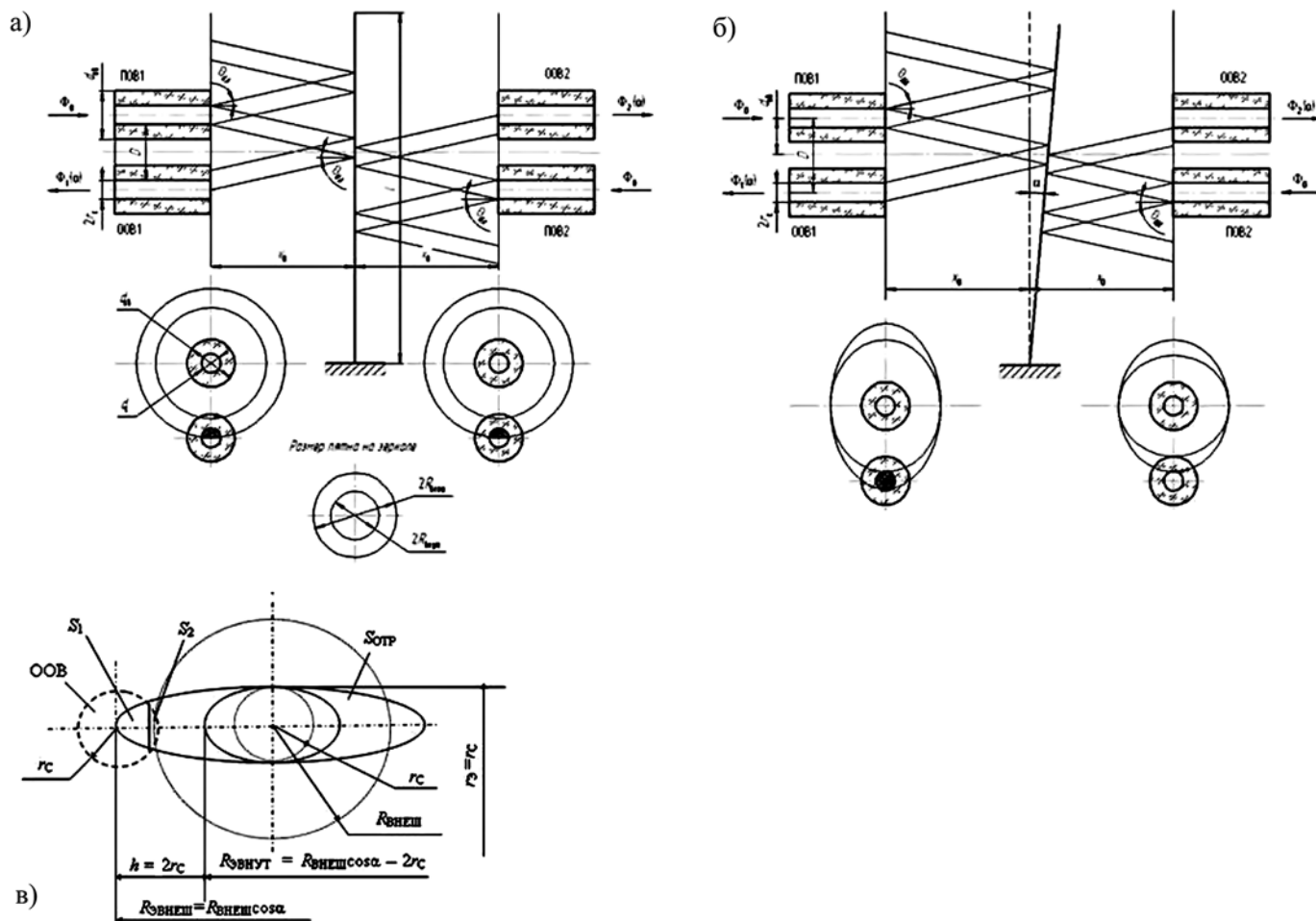


Рис. 4. Модуляция интенсивности световых потоков при помощи пластины, имеющей две зеркальные поверхности и перемещающейся относительно оптической оси оптических волокон под углом α

$$S_{\vartheta} = \pi r_c \cos^2 \alpha (4x_0 \operatorname{tg} \Theta_{NA} - r_c). \quad (5)$$

Тогда выражение (2) с учетом выражений (4) и (5) для первого и второго ИК переписывается следующим образом:

$$K(\alpha)_{1\text{канала}} = \left[\rho / \pi r_c \cos^2 \alpha (4x_0 \operatorname{tg} \Theta_{NA} - r_c) \right] \times \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \frac{(r_c \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} \right) \right] \right\}; \quad (6)$$

$$K(\alpha)_{2\text{канала}} = \left[\rho / \pi r_c \cos^2 \alpha (4x_0 \operatorname{tg} \Theta_{NA} - r_c) \right] \times \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(R \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2R \cos \alpha} \right) \right] + \frac{(r_c \cos \alpha)^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{2r_c \cos \alpha} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

Результаты

На рис. 5 построены графики зависимости тока фотодиодов от углов отклонения пластины первого и второго каналов $I_1 = f_1(\alpha)$ и $I_2 = f_2(\alpha)$, полученные в процессе реальной юстировки и оптической регулировки оптической системы разрабатываемого устройства для измерения параметров жидкостного потока.

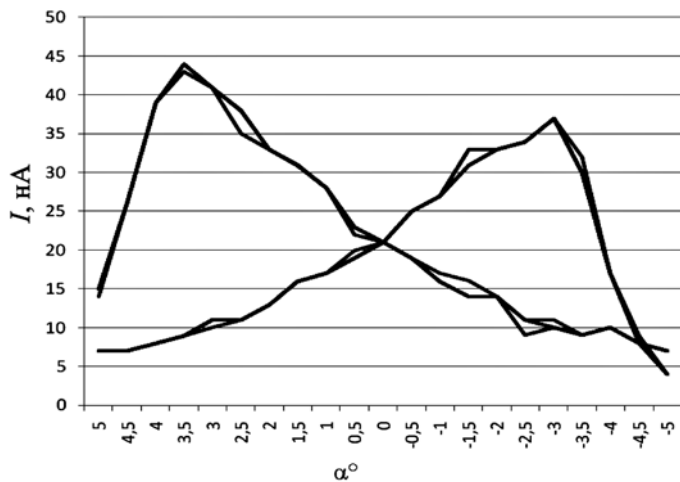


Рис. 5. Результаты юстировки оптической системы перемещения пластины с зеркальными поверхностями и при X_0 , равном 1; 1,5; 1,8; 2 мм ($0^\circ < \alpha < 5^\circ$ в обе стороны от вертикали)

Анализ полученных зависимостей позволяет выбрать функцию преобразования, наилучшим образом отвечающую критериям оптимальности. Из графика видно, что зависимость тока фотодиодов от угла отклонения пластины 10 линейная в диапазоне $\pm 3^\circ$, нелинейность функции преобразования проявляется в диапазоне углов $3 \dots 5^\circ$. Соответственно, диапазон измерения целесообразно ограничить значениями $\pm 3^\circ$.

Заключение

Предложенный способ и устройство для воспроизведения и измерения параметров жидкостных потоков (объема, скорости, расхода) позволят упростить процесс юстировки и настройки оптической системы волоконно-оптических датчиков расхода, применяемых в системах жизнеобеспечения космонавтов, улучшить их технические характеристики.

При финансовой поддержке в форме гранта Президента РФ ведущей научной школы РФ «Волоконно-оптическое приборостроение» 14.Z57.14.681-НШ.

При финансовой поддержке РФФИ в форме гранта № 15-08-02675.

Список литературы:

1. Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. – М.: Издательство «Машиностроение», 1986.
2. Серебряков В.Н. Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов. – М.: Издательство «Машиностроение», 1983.
3. Мурашкина Т.И. Разработка и внедрение волоконно-оптических средств измерений на летательных аппаратах – качественный скачок отечественной измерительной техники / Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах. Тезисы докладов 1-й Всероссийской научно-практической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 145-150.
4. ГОСТ 8.156-83 ГСОЕИ. Счетчик холодной воды. Методы и средства поверки.
5. Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г., Серебряков Д.И., Юрова О.В. Волоконно-оптический преобразователь углового перемещения / Патент РФ 2419765. МПК G01 В 21/00. Бюл. № 15, опубл. 27.05.2011 г.

*Татьяна Ивановна Мурашкина,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Приборостроение»,
Пензенский государственный университет,*

*Татьяна Викторовна Истомина,
д-р техн. наук, профессор,
ведущ. научный сотрудник,
Пензенский государственный технологический университет,*

*Елена Александровна Бадеева,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра БУНиА,
Пензенский государственный университет,*

*Дмитрий Иванович Серебряков,
канд. техн. наук, начальник лаборатории,
ОАО «НИИ физических измерений»,
Ольга Викторовна Юрова,
канд. техн. наук, учебный мастер,
Александр Юрьевич Удалов,
аспирант,
кафедра «Приборостроение»,
Пензенский государственный университет,*

*Елена Андреевна Шачнева,
магистрантка,
Пензенский государственный технологический университет,
г. Пенза,
e-mail: timurashkina@mail.ru*