

УДК 681.7.068

doi:10.21685/2072-3059-2022-2-6

Экспериментальные исследования волоконно-оптических систем измерения скорости жидкостных потоков

Е. А. Бадеева¹, Т. И. Мурашкина², Е. А. Шачнева³, М. В. Кузнецова⁴,
А. Н. Кукушкин⁵, А. А. Толова⁶, А. Г. Дворецкий⁷

^{1,2,4,5,6}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{3,7}Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета – МИРЭА, Москва, Россия

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³shachneva@mirea.ru,
⁴kmvnio@yandex.ru, ⁵kukushkin.97@mail.ru, ⁶nbeshkova@mail.ru, ⁷dvoretsky@sumirea.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* К средствам измерения скорости подачи топлива на борту воздушного судна предъявляются высокие требования по искро-взрыво-пожаробезопасности, 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, волоконно-оптические датчики на отечественном рынке пока уступают по требованиям электрическим средствам измерения, причиной чему послужило отсутствие достаточной информации о технологических особенностях их сборки, юстировки и настройки. В настоящий момент необходимо проведение экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность макетных образцов волоконно-оптических систем измерения скорости жидкостных потоков. *Материалы и методы.* Для проведения экспериментальных исследований волоконно-оптической системы измерения скорости потока жидкости разработана методика проведения экспериментальных исследований макетных образцов. *Результаты.* На основании проведенных экспериментальных исследований получены данные об основных технических характеристиках волоконно-оптической информационно-измерительной системы (ВОИИС), в состав которой входит волоконно-оптический датчик скорости потока жидкости. *Выводы.* Согласно проведенным исследованиям получены экспериментальные подтверждения работоспособности ВОИИС скорости жидкостных потоков в тяжелых условиях эксплуатации, в том числе в условиях перепадов температур.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, волоконно-оптическая система, измерение, скорость, жидкостный поток, волоконно-оптический датчик, юстировка, волоконно-оптический кабель, метрологическая характеристика

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и администрации Краснодарского края в виде гранта № 22-15-20069.

Для цитирования: Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Шачнева Е. А., Кузнецова М. В., Кукушкин А. Н., Толова А. А., Дворецкий А. Г. Экспериментальные исследования волоконно-оптических систем измерения скорости жидкостных потоков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 69–81. doi:10.21685/2072-3059-2022-2-6

Experimental studies of fiber-optic systems for measuring the velocity of liquid flows

© Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Шачнева Е. А., Кузнецова М. В., Кукушкин А. Н., Толова А. А., Дворецкий А. Г., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

E.A. Badeeva¹, T.I. Murashkina², E.A. Shachneva³, M.V. Kuznetsova⁴,
A.N. Kukushkin⁵, A.A. Tolova⁶, A.G. Dvoretzkiy⁷

^{1,2,4,5,6}Penza State University, Penza, Russia

^{3,7}Institute of Artificial Intelligence of the Russian
Technological University – MIREA, Moscow, Russia

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³shachneva@mirea.ru,
⁴kmvnio@yandex.ru, ⁵kukushkin.97@mail.ru, ⁶nbeshkova@mail.ru, ⁷dvoretzkiy@sumirea.ru

Abstract. *Background.* High requirements for spark-explosion-fire safety, as well as the absence of harmful electromagnetic influences, ease of installation, measurement accuracy and preservation of operability in severe operating conditions are imposed on the means of measuring the fuel supply rate on board the aircraft. Fiber-optic measuring instruments have proven themselves well for use in such conditions. Despite the obvious advantages, fiber-optic sensors (FOS) in the domestic market are still inferior in demand for electrical measuring instruments, the reason for which was the lack of sufficient information about the technological features of their assembly, alignment and adjustment. Now, it is necessary to conduct experimental studies confirming the operability of mock-up samples of fiber-optic systems for measuring the stability of liquid flows. *Materials and methods.* To conduct experimental studies of a fiber-optic system for measuring the fluid flow velocity, a methodology for conducting experimental studies of mock-up samples has been developed. *Results.* Based on the conducted experimental studies, data on the main technical characteristics of fiber-optic information and measurement systems (FOIMS), which includes a FOS of the fluid flow velocity, were obtained. *Conclusions.* According to the conducted studies, experimental confirmations of the operability of the FOIMS of the velocity of liquid flows in severe operating conditions and under conditions of temperature differences have been obtained.

Keywords: experimental research, fiber-optic system, measurement, velocity, liquid flow, fiber-optic sensor, alignment, fiber-optic cable, metrological characteristics

Acknowledgments: the research was financed by the Russian Science Foundation and Administration of Krasnodar Territory financed the research within the research project No. 20-38-90044.

For citation: Badeeva E.A., Murashkina T.I., Shachneva E.A., Kuznetsova M.V., Kukushkin A.N., Tolova A.A., Dvoretzkiy A.G. Experimental studies of fiber-optic systems for measuring the velocity of liquid flows. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(4):69–81. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-2-6

Введение

В условиях повышения уровня сложности, технологичности и интеграции систем современного воздушного судна или летательного аппарата остро встает вопрос обеспечения безопасности полетов [1, 2]. Поэтому к средствам измерения скорости подачи топлива на борту воздушного судна предъявляются высокие требования по искро-взрыво-пожаробезопасности. Кроме того, предъявляются требования высокой точности измерений в тяжелых условиях эксплуатации: при воздействии постоянных перепадов температур, вредных электромагнитных помех. Одними из самых надежных и пригодных для эксплуатации в подобных условиях являются волоконно-оптические средства измерений [2, 3].

Несмотря на очевидные преимущества, волоконно-оптические датчики (ВОД) и волоконно-оптические информационно-измерительные системы (ВОИИС) на их основе на отечественном рынке пока уступают по востребо-

ванности электрическим средствам измерения, причиной чему послужило отсутствие достаточной информации у потенциальных производителей о технологических особенностях их сборки, юстировки и настройки, результатах экспериментальных исследований их потенциальных возможностей в жестких условиях эксплуатации.

Вопросы, связанные с технологическими особенностями ВОД параметров жидкостных потоков отражательного типов, разработанных при участии авторов данной статьи, достаточно подробно рассмотрены в работах [4–7]. Были изготовлены ВОД и ВОИИС на их основе для измерения скорости потоков, конструктивно-технологические решения которых соответствуют данным, приведенным в этих публикациях.

Для подтверждения теоретических данных, полученных при исследовании ВОИИС скорости жидкостных потоков, необходимо провести экспериментальные исследования по определению основных метрологических характеристик основного ее элемента – ВОД скорости жидкостного потока: определить функцию преобразования, основную погрешность, дополнительную температурную погрешность с учетом определенной функции влияния температуры.

Для доказательства работоспособности разработанных и изготовленных макетных образцов ВОД отражательного типа и ВОИИС скорости жидкости на их основе необходимо экспериментальное подтверждение их технических характеристик и, соответственно, разработка методики испытаний.

Цель работы: разработка методики и проведение экспериментальных исследований макетных образцов ВОД отражательного типа и ВОИИС скорости жидкостных потоков по подтверждению их технических характеристик.

Материалы и методы

Для градуирования, настройки, экспериментальных исследований ВОИИС жидкостного потока использовали установку, описанную в работе [8], реализующую способ воспроизведения скорости жидкостного потока, рассмотренный в работе [9]. Диапазоны измерения/воспроизведения скорости: 0,2...4,5 м/с.

В измерительную установку входят следующие компоненты для фиксации и отображения измерительной информации: ВОД скорости потоков жидкости, электронный блок преобразования информации (БПИ), вольтметр, адаптер БПИ, персональный компьютер (ПК), программное обеспечение (ПО) и база данных (БД) (рис. 1).

Установка позволяет воспроизвести поток жидкости, с ее помощью можно проверить работоспособность ВОД скорости потока жидкости, определить его функцию преобразования и основную погрешность.

Принцип действия установки основан на прохождении известного объема жидкости за фиксируемое время [9, 10]. Перед началом измерений фиксируется уровень жидкости в первой емкости, а в конце измерений фиксируется уровень во второй емкости. Время работы отсчитывается таймером, и по формуле, приведенной в работе [9], определяется скорость жидкости. Датчик на трубопроводе установлен так, что на пути потока установлен его погружной элемент. Поток давит на погружной элемент с некоторой силой, под действием которой он отклоняется на угол α [7]. Электрический сигнал с выхода датчика поступает на вход БПИ, который состоит из сумматора, делителя и

вычислительного устройства. Сигнал с выхода БПИ подается или на вольтметр, или на адаптер БПИ, где сигнал окончательно оцифровывается и передается на персональный компьютер.

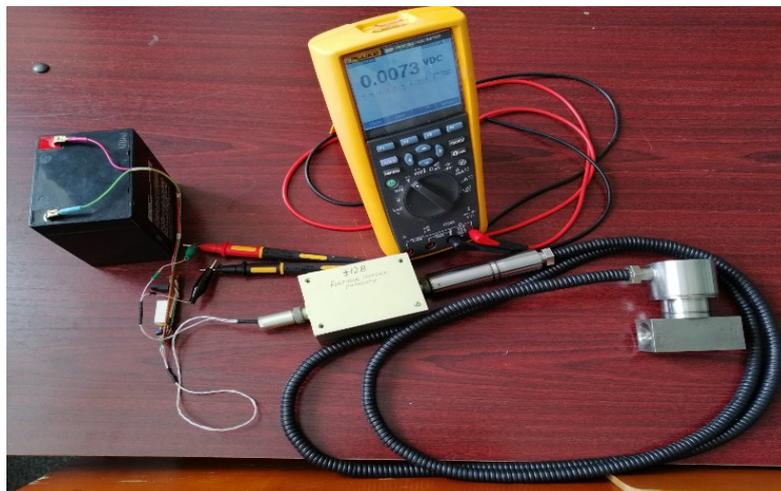


Рис. 1. Экспериментальный образец разработанной волоконно-оптической системы измерения скорости жидкостных потоков

Информация с выхода вольтметра, ПК, таймера, градуировочных шкал двух емкостей поступает к экспериментатору, который в соответствии с программой исследований делает соответствующие выводы о ходе эксперимента.

Результаты

Определение основной погрешности волоконно-оптического датчика скорости жидкостного потока

Необходимо определить составляющие основной погрешности [11]:

– погрешность линейности:

$$\Delta U_{\text{л}} = |U_{\text{э}} - U_{\text{л}}|_{\text{max}}; \quad (1)$$

– погрешность невоспроизводимости:

$$\Delta U_{\text{н}} = \max |U_{ij \text{ max}}^{\text{M}} - U_{ij \text{ min}}^{\text{M}}|; \quad (2)$$

– погрешность вариации:

$$\Delta U_{\text{вар}} = \max |U_{ij \text{ max}}^{\text{б}} - U_{ij \text{ min}}^{\text{M}}|; \quad (3)$$

– погрешность градуирования:

$$\Delta U_{\text{гр}} = \max |U_{ij}^{\text{сп}} - U_{ij}^{\text{M}}| \text{ или } \Delta U_{\text{гр}} = \max |U_{ij}^{\text{сп}} - U_{ij}^{\text{б}}|, \quad (4)$$

где $U_{\text{э}}$, $U_{\text{л}}$ – выходное напряжение экспериментальной зависимости и аппроксимирующей прямой; U_{ij}^{M} , $U_{ij}^{\text{б}}$, $U_{ij \text{ max}}^{\text{M}}$, $U_{ij \text{ min}}^{\text{M}}$, $U_{ij \text{ max}}^{\text{б}}$, $U_{ij \text{ min}}^{\text{б}}$ – экспе-

риментальные значения выходного напряжения в i -й точке, j -м цикле градуирования со стороны меньших и больших значений точек градуирования соответственно; U_{ij}^{cp} – среднее значение выходного напряжения.

В соответствии с формулами (1)–(4) определяем основную погрешность, учитывая случайный характер погрешностей вариации и невоспроизводимости и систематический характер погрешностей линейности и градуирования:

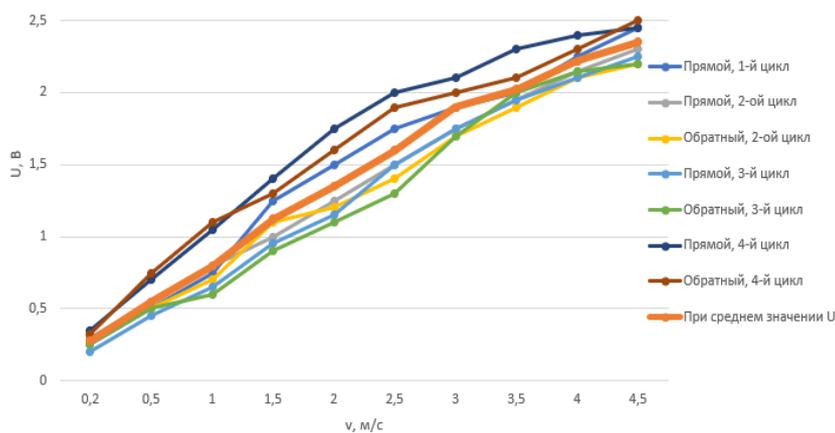
$$\Delta_o = \sqrt{\sum(\Delta_{\text{вар}} + \Delta_{\text{н}})^2 + \sum(\Delta_{\text{л}} + \Delta_{\text{гр}})^2}, \quad (5)$$

Результаты градуировки макетного образца ВОИИС скорости потока с диапазоном измерения (0,2...4,5) м/с приведены в табл. 1, по которым построены градуировочные характеристики для каждого цикла градуирования и усредненная градуировочная характеристика (рис. 2), которая заносится в документацию. Результаты измерений скорости потока по временной оси при подключении ВОИИС к ПК показаны на рис. 3.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований
для построения графической зависимости $U = f(v)$

i	v , м/с	U , В								Среднее значение напряжения, U_{cp} , В		
		1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		4-й цикл		U_{cp}^{M}	$U_{\text{cp}}^{\text{б}}$	U_{cp}
		Прямой, U_1^{M}	Обратный, $U_1^{\text{б}}$	Прямой, U_2^{M}	Обратный, $U_2^{\text{б}}$	Прямой, U_3^{M}	Обратный, $U_3^{\text{б}}$	Прямой, U_4^{M}	Обратный, $U_4^{\text{б}}$			
1	0,2	0,25	0,24	0,3	0,27	0,2	0,25	0,35	0,32	0,28	0,27	0,275
2	0,5	0,5	0,45	0,55	0,5	0,45	0,5	0,7	0,75	0,55	0,55	0,55
3	1	0,75	0,7	0,8	0,7	0,65	0,6	1,05	1,1	0,81	0,78	0,795
4	1,5	1,25	1,2	1	1,1	0,95	0,9	1,4	1,3	1,15	1,1	1,125
5	2	1,5	1,4	1,25	1,2	1,15	1,1	1,75	1,6	1,4	1,3	1,35
6	2,5	1,75	1,7	1,5	1,4	1,5	1,3	2	1,9	1,7	1,5	1,6
7	3	1,9	1,8	1,75	1,7	1,75	1,7	2,1	2	1,9	1,8	1,7
8	3,5	2	1,95	1,95	1,9	1,95	2	2,3	2,1	2,05	2	2,03
9	4	2,25	2,2	2,15	2,1	2,1	2,15	2,4	2,3	2,2	2,2	2,22
10	4,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,25	2,2	2,5	2,5	2,4	2,3	2,35


 Рис. 2. Графические зависимости экспериментальных исследований $U = f(v)$

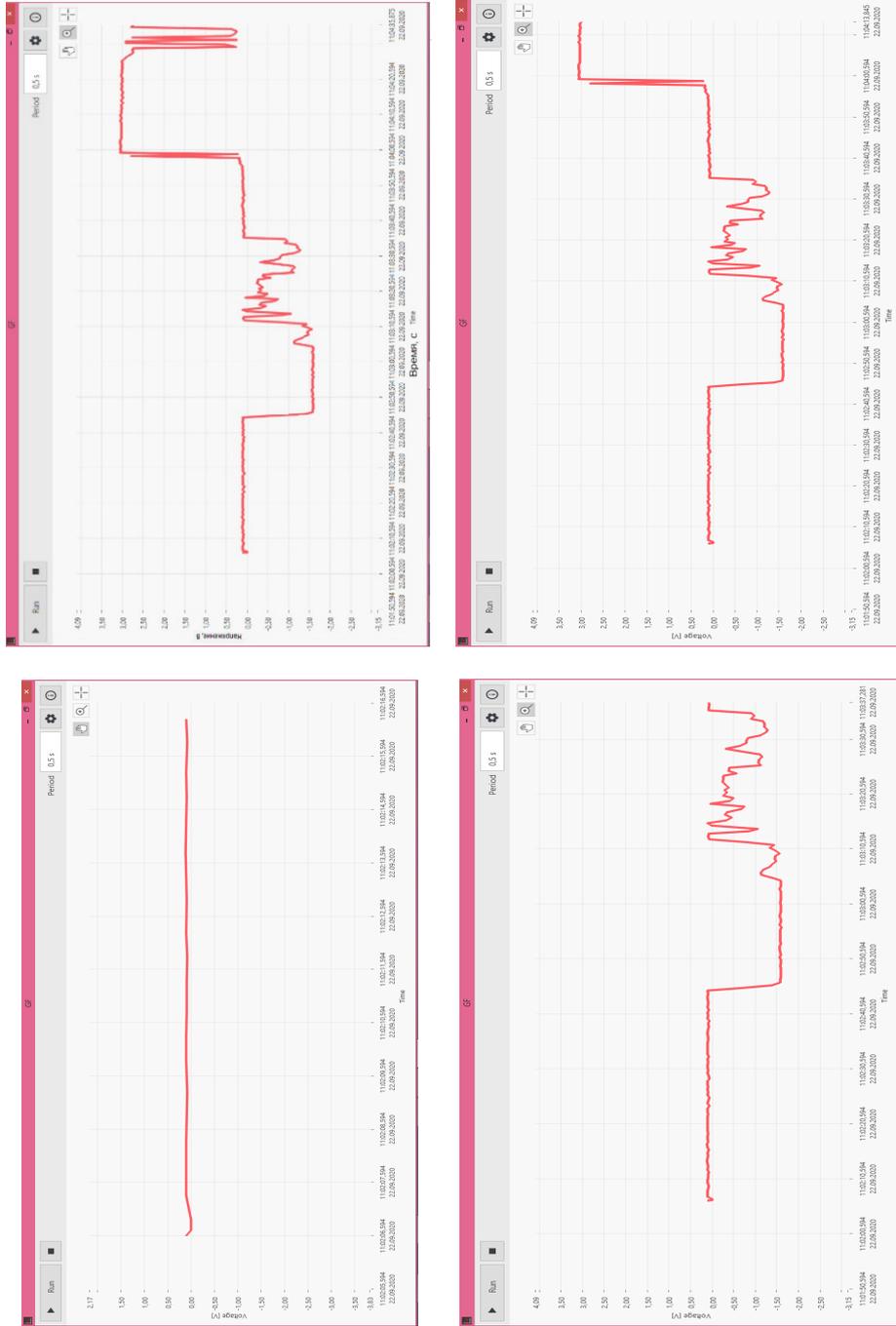


Рис. 3. Результаты измерений скорости потока по временной оси при подключении ВОИИС к ПК

Определена основная погрешность в соответствии с формулами (1)–(5), значение которой составило 1,96 %. Здесь необходимо отметить, что для известных средств измерения скорости жидкостных потоков это значение существенно выше 3–5 %. Это обусловлено несовершенством средств образцового воспроизведения параметров жидкостных потоков.

**Определение функции влияния температуры
волоконно-оптического датчика скорости жидкостного потока**

В соответствии с работой [12] вид функции влияния (ФВ) температуры $\Psi(T, v)$ рекомендуется определять на начальной стадии исследований и разработки средства измерения скорости v жидкостного потока по формуле [6]:

$$\Psi(T, v) = \Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2 + \Theta_3 T v + \Theta_4 T^2 v + \Theta_5 v, \quad (6)$$

где $\Theta_0, \dots, \Theta_5$ – коэффициенты ФВ температуры.

Но в этом случае объем испытаний будет очень большой и длительный, поэтому с минимальной методической погрешностью (менее 1 %) принимаем в качестве исходной следующую математическую модель:

$$\psi(T) = \Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2. \quad (7)$$

В соответствии с работой [12] план эксперимента по определению коэффициентов ФВ температуры будет соответствовать приведенному в табл. 2.

Таблица 2

План эксперимента для определения
коэффициентов функции влияния температуры

Вид функции влияния температуры $\Psi(T, v)$	Номер опыта		
	1	2	3
$\Theta_0 + \Theta_1 T + \Theta_2 T^2$	$T_1 = T_{\min}$ $v_1 = v_{\text{ср}}$	$T_2 = T_{\text{нр}}$ $v_2 = v_{\text{ср}}$	$T_3 = T_{\max}$ $v_3 = v_{\text{ср}}$
	$T_1 = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_1 = 5 \text{ м/с}$	$T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_2 = 5 \text{ м/с}$	$T_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_3 = 5 \text{ м/с}$
Выходное напряжение, U	$U_1(T_{\min})$	$U_2(T_{\text{нр}})$	$U_3(T_{\max})$

В табл. 2 приняты следующие обозначения: $\Psi(T, v)$ – функция влияния температуры; $\Theta_{0..n}$ – коэффициенты ФВ температуры на значения измеряемой физической величины – скорости жидкостного потока; $T_{\min} \dots T_{\max}$ – диапазон изменения температуры; $T_{\text{нр}}$ – значение температуры в нормальных условиях; $v_{\text{ср}} = v_1 = v_2 = v_3$ – среднее значение скорости жидкостного потока.

Проведение эксперимента по определению ФВ температуры проводилось в следующей последовательности:

1. Собрали схему в соответствии с рис. 4.
2. Датчик закрепили на установке по воспроизведению скорости жидкостного потока.
3. В камере тепла и холода SBT-2011 [13] установили температуру $(25 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$, при которой датчик выдержали 2 ч.
4. Жидкость подавалась со скоростью $v_{\text{ср}} = 5 \text{ м/с}$ в течение $(30 \dots 60) \text{ с}$, при этом проводились измерения выходного напряжения.

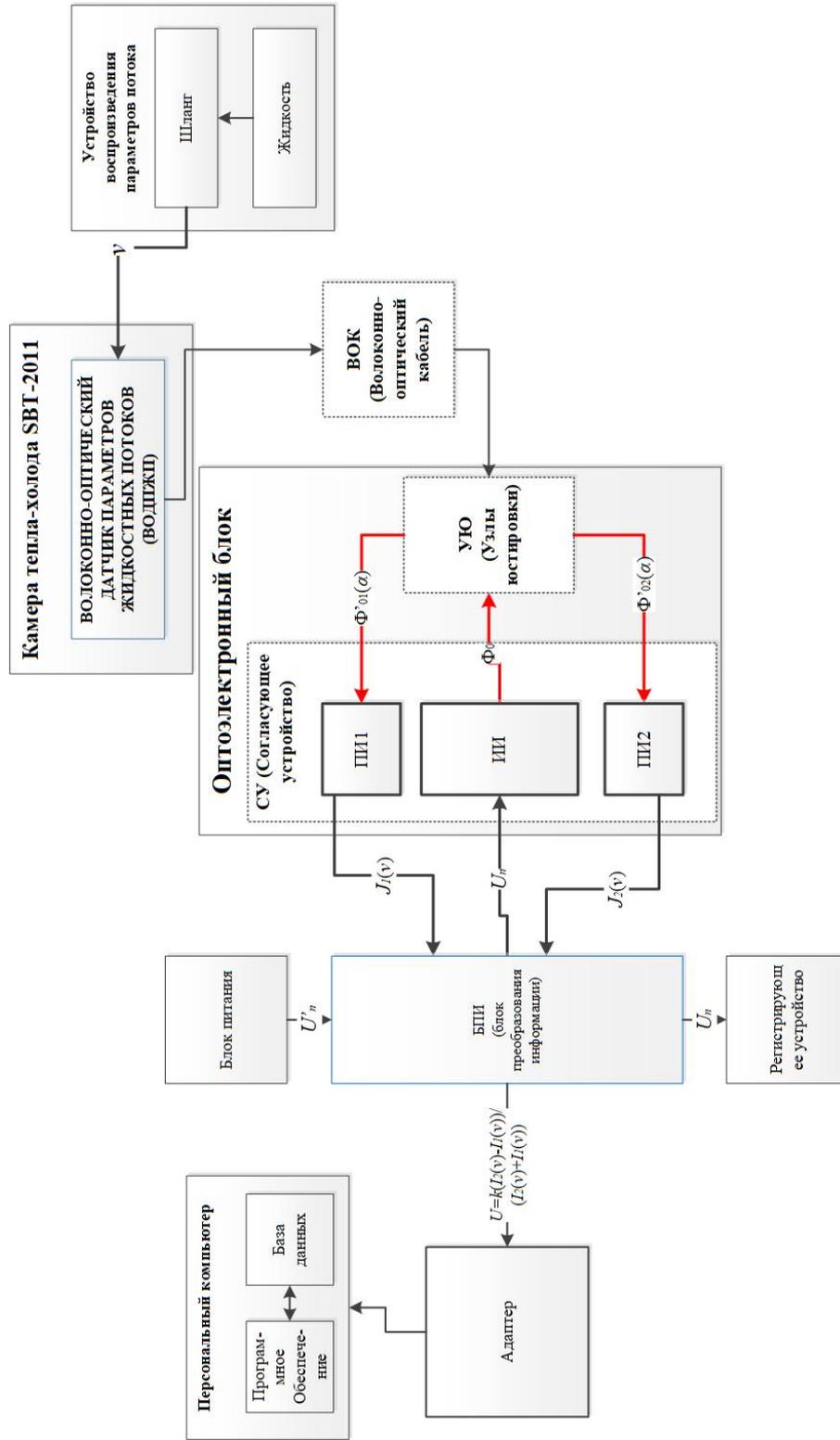


Рис. 4. Схема проведения испытаний в камере тепла и холода

Результаты измерений занесены в таблицу по форме табл. 2.

5. В камере тепла и холода SBT-2011 установили температуру минус (60 ± 3) °С, при которой датчик выдержали 2 ч.

6. Повторялись операции по п. 4.

7. В камере тепла и холода SBT-2011 установили температуру (150 ± 3) °С, при которой датчик выдержали 2 ч.

8. Повторялись операции по п. 4.

9. Используя результаты измерений, определяли коэффициенты функции влияния температуры и дополнительную температурную погрешность датчика по максимальному отклонению выходного напряжения от значения, соответствующего градуировочной характеристике.

При проведении эксперимента по определению ФВ температуры в камере тепла и холода SBT-2011 поместили ту часть датчика, которая будет при эксплуатации находиться в зоне действия влияющих величин, т.е. волоконно-оптический преобразователь угловых микроперемещений [7].

Остальные элементы находились за ее пределами. Подача жидкости осуществлялась через силиконовый шланг, выдерживающий перепады температуры от минус 60 до плюс 300 °С.

Дополнительная температурная погрешность для экспериментального образца ВОИИС параметров жидкостных потоков составила 1,2 %.

Обсуждение

По результатам проведенных экспериментальных исследований определены технические характеристики лабораторного образца ВОИИС (табл. 3), которые подтверждают работоспособность ВОИИС скорости жидкостного потока в жестких условиях эксплуатации [5].

Таблица 3

Основные характеристики разработанной ВОИИС

Технические характеристики	Значение	Примечание
1	2	3
Диапазон измерения скорости жидкости, м/с	0,2...4,5	экспериментально подтвержденное значение (<i>диапазон может быть изменен по требованию заказчика</i>)
Диапазон изменения выходного напряжения постоянного тока, В	0...6	экспериментально подтвержденное значение (<i>возможен цифровой сигнал</i>)
Основная приведенная погрешность, не более, %	$\pm 1,5$	экспериментально подтвержденное значение
Погрешность линейности, не более, %	0,1	экспериментально подтвержденное значение
Дополнительная приведенная температурная погрешность, %	1,2	экспериментально подтвержденное значение
Чувствительность совместно с БПИ, мВ/м/с	3	экспериментально подтвержденное значение

Окончание табл. 3

1	2	3
Габаритные размеры – датчика, мм – БПИ, мм – длина ВОК, м	Ø30×20 80×50×50 2...200	измеренные значения
Масса датчика/БПИ, г	170/250	измеренные значения
Рабочий диапазон температур в зоне установки датчика, °С	от минус 50 до плюс 250	для топливной системы самолета-истребителя
	до плюс 600	время воздействия до 5 с расчетное значение исходя из выбора комплектующих
Рабочий диапазон температур БПИ, °С	от минус 50 до плюс 50	расчетное значение исходя из выбора комплектующих

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования макетного образца ВОИИС, включающей ВОД скорости жидкостного потока, ВОК, согласующее устройство, БПИ, реализующий логометрическое преобразование измерительной информации, блок питания, регистрирующее устройство (мультиметр), позволили определить ее основные технические системы для измерения скорости жидкостного потока (см. табл. 3).

Список литературы

1. Сенюшкин Н. С., Салимова И. И., Султанов Р. Ф., Хуснуллина В. Р. Влияние условий эксплуатации и хранения летательных аппаратов на их техническое состояние и работу двигателя // Молодой ученый. 2015. № 5 (85). С. 183–186. URL: <https://moluch.ru/archive/85/15961/> (дата обращения: 30.04.2022).
2. Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А., Славкин И. Е., Кукушкин А. Н. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 87–98.
3. Бадеева Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.16. Пенза, 2017. 463 с.
4. Polyakova E. A., Murashkina T. I., Badeeva E. A. [et al.]. Principles of reliability improvement of fiber-optic sensors for rocket and space equipment and aeronautical engineering // International Seminar on Electron Devices Design and Production. 2019. P. 8798458.
5. Шачнева Е. А. Способы юстировки волоконно-оптического датчика скорости движения жидкости // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4. С. 65–72. doi:10.21685/2307-5538-2020-4-8
6. Шачнева Е. А., Мурашкина Т. И., Удалов А. Ю. ВОД расхода жидкостных сред для системы жизнеобеспечения космонавтов // Сборник конкурсных докладов XIII Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. М. : ФГБУ науки Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2015. С. 361–366.

7. Murashkina T. I., Khasanshina N. A., Shachneva E. A., Polyakova E. A. Technological characteristics of assembly procedure for fiber-optic sensors of fluid media parameters // *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020. Vol. 1515. P. 052060.
8. Патент 2741276 Российская Федерация. Волоконно-оптический датчик параметров жидкостных и воздушных потоков / Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Шачнева Е. А., Хасаншина Н. А. Оpubл. 22.01.2021, Бюл. № 3.
9. Шачнева Е. А., Хасаншина Н. А., Мурашкина Т. И. Способ и установка для измерения расхода жидкости при проведении лабораторного анализа // *Современные проблемы биомедицинской инженерии : сб. Всерос. молодежной научной конференции (г. Саратов, 6–8 апреля 2015 г.) / под ред. В. Н. Лясникова. М. : Изд-во ПРОНДО, 2015. С. 28–32.*
10. Бадеева Е. А., Шачнева Е. А., Серебряков Д. И. [и др.]. Способ измерения параметров жидкостных потоков // *Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии : материалы Междунар. конф. IT + M&Eс`2015 – 2015. Весенняя сессия / под ред. Е. Л. Глориозова. М. : Изд-во ООО «Институт новых информационных технологий», 2015. С. 183–190.*
11. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Бадеев А. В., Славкин И. Е., Кукушкин А. Н. *Техника физического эксперимента : метод. указания. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 38 с.*
12. Мурашкина Т. И. *Техника физического эксперимента и метрология : учеб. пособие. СПб. : Политехника, 2015. 138 с.*
13. Настольная бесшумная камера холода и тепла SBT-211 // *КриоТехника*. URL: <http://cryo-tech.ru/products/sb/sbt-2x1> (дата обращения: 20.01.2019).

References

1. Senyushkin N.S., Salimova I.I., Sultanov R.F., Khusnullina V.R. The effect of aircraft operating and storage conditions on their technical condition and engine operation. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2015;(5):183–186. (In Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/85/15961/> (accessed 30.04.2022).
2. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Polyakova E.A., Slavkin I.E., Kukushkin A.N. Implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;(2):87–98. (In Russ.)
3. Badeeva E.A. Fiber-optic pressure sensors for information-measuring systems of rocket-space and aviation technology. DSc dissertation. Penza, 2017:463. (In Russ.)
4. Polyakova E.A., Murashkina T.I., Badeeva E.A. [et al.]. Principles of reliability improvement of fiber-optic sensors for rocket and space equipment and aeronautical engineering. *International Seminar on Electron Devices Design and Production*. 2019:8798458.
5. Shachneva E.A. Methods for aligning a fiber-optic fluid velocity sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Control*. 2020;(4):65–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2020-4-8
6. Shachneva E.A., Murashkina T.I., Udalov A.Yu. Fiber-optic flow sensors for liquid media for the life support system of astronauts. *Sbornik konkursnykh dokladov KhIII Vserossiyskogo molodezhnogo Samarskogo konkursa-konferentsii nauchnykh rabot po optike i lazernoy fizike = Proceedings of the 13th All-Russian Youth Samara competition-conference of scientific papers in optics and laser physics*. Moscow: FGBU nauki Fizicheskiiy institut im. P. N. Lebedeva RAN, 2015:361–366. (In Russ.)
7. Murashkina T.I., Khasanshina N.A., Shachneva E.A., Polyakova E.A. Technological characteristics of assembly procedure for fiber-optic sensors of fluid media parameters. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1515:052060.

8. Patent 2741276 Russian Federation. Fiber optic sensor for liquid and air flow parameters. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Shachneva E.A., Khasanshina N.A.; publ. 22.01.2021, bull. № 3. (In Russ.)
9. Shachneva E.A., Khasanshina N.A., Murashkina T.I. Method and installation for measuring fluid flow during laboratory analysis. *Sovremennye problemy biomeditsinskoj inzhenerii: sb. Vseros. molodezhnoy nauchnoy konferentsii (g. Saratov, 6–8 aprelya 2015 g.) = Modern problems of biomedical engineering: proceedings of the All-Russian youth scientific conference (Saratov, April 6-8, 2015)*. Moscow: Izd-vo PRONDO, 2015:28–32. (In Russ.)
10. Badeeva E.A., Shachneva E.A., Serebryakov D.I. (et al.). Method for measuring the parameters of liquid flows. *Novye informatsionnye tekhnologii v meditsine, biologii, farmakologii i ekologii: materialy Mezhdunar. konf. IT + M&Ec`2015 – 2015. Vesenniyaya sessiya = New information technologies in medicine, biology, pharmacology and ecology: proceedings of the International conference IT + M&Ec`2015 – 2015. Spring session*. Moscow: Izd-vo OOO «Institut novykh informatsionnykh tekhnologiy», 2015:183–190. (In Russ.)
11. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Badeev A.V., Slavkin I.E., Kukushkin A.N. *Tekhnika fizicheskogo eksperimenta: metod. ukazaniya = Technique of physical experiment: methodical instructions*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:38. (In Russ.)
12. Murashkina T.I. *Tekhnika fizicheskogo eksperimenta i metrologiya: ucheb. posobie = Technique of physical experiment and metrology: textbook*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2015:138. (In Russ.)
13. Desktop silent chamber of cold and heat SBT-211. *KrioTekhnika = CryoTechnique*. (In Russ.). Available at: <http://cryo-tech.ru/products/sb/sbt-2x1> (accessed 20.01.2019).

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектроники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the sub-department of radio engineering and radio electronics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Елена Андреевна Шачнева

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной информатики, Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета – МИРЭА (Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78, корпус А)

E-mail: shachneva@mirea.ru

Elena A. Shachneva

Candidate of engineering sciences, senior lecturer of the sub-department of industrial informatics, Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University – MIREA (building A, 78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Марина Владимировна Кузнецова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-
вычислительных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kmvnio@yandex.ru

Marina V. Kuznetsova

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the sub-
department of information and computing
systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Николаевич Кукушкин

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kukushkin.97@mail.ru

Aleksey N. Kukushkin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Анастасия Андреевна Толова

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nbeshkova@mail.ru

Anastasiya A. Tolova

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Артур Геннадьевич Дворецкий

магистрант, Институт искусственного
интеллекта Российского
технологического университета –
МИРЭА (Россия, г. Москва,
пр-т Вернадского, 78, корпус А)

E-mail: dvoretsky@sumirea.ru

Artur G. Dvoretzkiy

Master's degree student, Institute
of Artificial Intelligence of the Russian
Technological University – MIREA
(building A, 78 Vernadskogo avenue,
Moscow, Russia)

Поступила в редакцию / Received 05.04.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 30.04.2022

Принята к публикации / Accepted 13.05.2022