

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АКТИВНОГО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ОПОРНОГО УЧАСТКА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В СОСТАВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ¹

© 2023 г. А. О. Чернуцкий^{a,*}, Р. И. Хан^a, Т. В. Гриценко^a, К. И. Кошелев^a,
А. А. Жирнов^a, А. Б. Пнев^a

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

*e-mail: chernutsky.a@bmstu.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 18.04.2023 г.

Проведено исследование влияния флуктуаций температуры опорного участка оптического волокна в составе приборной части на абсолютную погрешность измерения распределенного волоконно-оптического датчика температуры. Предложена и экспериментально исследована конструкция опорного участка с активным термостатированием с высокой стабильностью в составе приборной части датчика. Экспериментально продемонстрирована эффективность применения активного термостатирования для улучшения повторяемости измерений и уменьшения погрешности измерения.

DOI: 10.31857/S0032816223050075, EDN: ZJENRS

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение температуры уже достаточно давно является важной проблемой в научных и прикладных исследованиях. Появление волоконно-оптических датчиков (ВОД) для измерения температуры относят к концу 70-х—началу 80-х гг. Именно тогда, во время бурного развития телекоммуникационных технологий, складывается элементная база таких устройств, как полупроводниковые лазерные диоды, работающие при комнатной температуре, приемники оптического излучения, разветвители, мультиплексоры и др. В научной литературе появляются концепции применения сенсоров нового типа. Начали создаваться датчики измерения температуры: точечные [1, 2], на основе волоконных интерферометров и волоконных брэгговских решеток [3], а также др. Эти датчики находили применение, например, при измерении температуры в агрессивных средах, но их использование было затратно по сравнению с традиционными. Все это дало толчок развитию идеи мультиплексирования сенсоров в одну волоконную линию и использования одного опросного устройства, что позволило снизить

стоимость одной точки измерения ([4]). В конце 70-х—начале 80-х гг. начинают формироваться предпосылки создания датчиков нового типа — распределенных датчиков, которые также подразделяются на несколько видов в зависимости от типа полезного сигнала и метода измерения.

В 1982 г. А. Хартогом и Д. Пэйном был продемонстрирован распределенный датчик, в котором использовалось волокно с жидкой сердцевинной, опрашиваемое методом рефлектометрии во временной области [5, 6]. В 1985 г. Дж. Дакин опубликовал первые экспериментальные результаты по созданию распределенного волоконно-оптического датчика температуры (ВОДТ) на основе рассеяния Рамана с использованием метода рефлектометрии во временной области [7]. Появляются первые исследования распределенных волоконных датчиков на основе рассеяния Мандельштама—Бриллюэна [8] и на основе рассеяния Рэлея [6]. Таким образом, в 80-е гг. начинают формироваться представления об областях использования волоконных датчиков новых типов и предпринимаются первые попытки их коммерциализации.

Классические электронные температурные сенсоры (термопары, термисторы, термометры сопротивления) имеют хорошо отслеживаемую историю своего развития и активно применяются

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

в промышленных проектах, приборах, в повседневной жизни. Однако они имеют недостатки, связанные с чувствительностью к электромагнитным помехам, необходимостью обеспечения электрического питания и др. Стоит также отметить, что при использовании классических термометрических датчиков очень сложно и экономически неэффективно организовать измерения профиля температуры на больших расстояниях.

В конце 90-х гг крупные энергетические компании были заинтересованы в распределенных датчиках температуры и использовали их для мониторинга электросетей. В это время на рынке устройств появляются ВОД на основе рассеяния Рамана от производителей из Японии (“Hitachi Cable”, “Fujikura”, “Furukawa”, “Sumitomo Electric”, “Toshiba”) и Великобритании (“York Sensors Ltd.”). Позднее технология распределенной термометрии начала использоваться в мониторинге нефтяных скважин, и рынок пополнился устройствами от крупных нефтегазовых сервисных компаний, таких как: “Halliburton”, “Schlumberger” (США), “Weatherford” (Швейцария), а также от появившихся новых компаний: “Silixa”, “Sensonet”, “Optasense” (Великобритания), “LIOS Technology”, “AP Sensing” (Германия), “Bandweaver Technologies” (КНР).

Использование ВОД в промышленности получает распространение в связи с развитием автоматизированных систем контроля и управления, разработкой и внедрением новых технологических процессов [9]. Волоконно-оптические датчики в сравнении с электрическими датчиками температуры имеют явные преимущества: высокую чувствительность, широкий динамический диапазон, компактность, надежность и долговечность. Первоначально ВОД применялись в ситуациях, в которых электрические устройства вообще нельзя использовать, например, в агрессивной среде, при высоких температурах и в условиях электромагнитных помех, а также при контроле протяженных объектов, когда размещение большого количества электрических точечных датчиков становится экономически нецелесообразным.

Волоконно-оптические датчики в разных конфигурациях нашли применение в следующих отраслях: горнодобывающей, промышленной [10], нефтяной и газовой, гидроэнергетике, строительстве, авиации и космосе [11]. Одно из многочисленных применений ВОД в строительстве — неразрушающий контроль состояния крупных сооружений, подверженных резким изменениям температуры [12]. Использование ВОД позволяет осуществлять мониторинг температуры несущих конструкций с целью своевременного предупреждения возможных разрушений [13].

2. РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РАССЕЯНИЯ РАМАНА

Одним из распространенных типов волоконных систем является распределенный ВОД, принцип работы которого основан на анализе компонент комбинационного рассеяния света в оптическом волокне. Информация о температуре участка волокна может быть получена из отношения интенсивностей рассеяния стоксовой и антистоксовой компонент на этом участке с использованием метода оптической рефлектометрии во временной области. Регистрируемые оптическими приемниками интенсивности I компонент рассеяния вдоль сенсорного волокна с координатой z и температурой T можно выразить соотношениями:

$$I_{\text{аст}}(z, T) = P_0 \frac{c\tau}{n} [\exp(h\Delta\nu / (kT(z))) - 1]^{-1} \eta_{\text{аст}} \times \\ \times \exp\left(-\int_0^z (\alpha_0(u) + \alpha_{\text{аст}}(u)) du\right),$$

$$I_{\text{ст}}(z, T) = P_0 \frac{c\tau}{n} [1 - \exp(-h\Delta\nu / (kT(z)))]^{-1} \eta_{\text{ст}} \times \\ \times \exp\left(-\int_0^z (\alpha_0(u) + \alpha_{\text{ст}}(u)) du\right),$$

где P_0 — пиковая мощность импульса зондирования; c — скорость света в вакууме; τ — длительность зондирующего импульса; n — коэффициент показателя преломления в волокне; α_0 , $\alpha_{\text{аст}}$, $\alpha_{\text{ст}}$ — коэффициенты затухания на зондирующей, антистоксовой и стоксовой длинах волн соответственно; $\eta_{\text{аст}}$, $\eta_{\text{ст}}$ — коэффициенты сечения обратного рассеяния для антистоксовой и стоксовой компонент; $[1 - \exp(-h\Delta\nu / (kT))]^{-1}$ и $[\exp(h\Delta\nu / (kT)) - 1]^{-1}$ — коэффициенты Бозе–Эйнштейна распределения плотностей вероятностей фононов для стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния соответственно; h — постоянная Планка; $\Delta\nu \sim 13.2$ ТГц — частота возбуждающего излучения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Отношение интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния с учетом затухания в оптическом волокне выразятся как:

$$R(T(z)) = \frac{I_{\text{аст}}(z, T)}{I_{\text{ст}}(z, T)} = \frac{v_{\text{аст}}^4}{v_{\text{ст}}^4} \exp\left(-\frac{hc\Delta\nu}{kT(z)}\right) \times \\ \times \exp\left(-\int_0^z (\alpha_{\text{аст}}(u) - \alpha_{\text{ст}}(u)) du\right).$$

Обычно в распределенный ВОДТ на основе комбинационного рассеяния добавляют участок опорного волокна между чувствительным волокном (линейной частью) и модулем спектрального демультимплексора. Опорный участок имеет известную температуру (либо стабилизируется, либо измеряется), что позволяет скомпенсировать влияние ряда потенциально изменяемых параметров системы. Опорный участок играет важную роль в вычислении температуры вдоль волоконной линии и используется для нормализации сигналов от чувствительного волокна и от опорного участка.

Температура опорного участка волокна измеряется с помощью совмещенного с ним электрического датчика температуры, она необходима для проведения расчета значения температуры вдоль сенсорного волокна по рефлектограммам обратного рассеяния.

Для конфигурации распределенного ВОДТ с опорным участком с известной температурой $T_{\text{оп}}$ необходимо нормировать $R(T)$ на значение $R(T_{\text{оп}})$, в результате получим:

$$R_{\text{оп}}(T(z)) = \frac{R(T(z))}{R(T_{\text{оп}})} = \exp\left(\frac{hc\Delta\nu}{k}\left(\frac{1}{T_{\text{оп}}} - \frac{1}{T(z)}\right)\right) \times \exp\left(-\int_{z_{\text{оп}}}^z (\alpha_{\text{аст}}(u) - \alpha_{\text{ст}}(u)) du\right),$$

где $T_{\text{оп}}$ — температура опорного волокна; $z_{\text{оп}}$ — координата конца опорной катушки с волокном.

Далее, нормируя $R(z, T)$ на значение $R_{\text{оп}}(z_{\text{оп}}, T_{\text{оп}})$, выразим температуру. Таким образом, формула для вычисления термограммы имеет следующий вид:

$$T(z) = \frac{1}{\frac{1}{T_{\text{оп}}} - \gamma \left(\ln \left(\frac{R(z, T)}{R_{\text{оп}}(z_{\text{оп}}, T_{\text{оп}})} \right) + \Delta\alpha(z - z_{\text{оп}}) + C \right)},$$

где C — безразмерный калибровочный коэффициент; $\Delta\alpha$, м^{-1} — коэффициент, учитывающий дифференциальное затухание между сигналами стоксовой и антистоксовой составляющих в обратнорассеянном сигнале; $\gamma = \frac{k}{hc\Delta\nu}$, K — калибровочный коэффициент, учитывающий сдвиг длины волны рассеянного излучения относительно длины волны зондирующего излучения.

Температура вдоль линейной части сенсора распределенного ВОДТ вычисляется по рефлектограммам комбинационного рассеяния света и в общем случае зависит от коэффициента затухания и температуры опорного участка оптического волокна. Коэффициент затухания линейной ча-

сти волокна имеет постоянное значение, определяемое в процессе калибровки распределенного ВОДТ, тогда как температура опорного участка оптического волокна должна измеряться при каждом получении рефлектограмм обратного рассеяния. К опорному участку предъявляются требования по его эффективной длине, расположению относительно элементов с тепловыделением и учету влияния внешней температуры на повторяемость измерений распределенного ВОДТ. Однако в полной мере вопрос влияния флуктуаций опорного участка на повторяемость и погрешность измерений температуры с помощью распределенного ВОДТ мало изучен [14, 15].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПОРНОГО УЧАСТКА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДАТЧИКОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

К конструкции опорного участка распределенного ВОДТ, как было сказано выше, предъявляется мало требований. Катушка с волокном (длиной, не менее чем в 10 раз превышающей интервал выборки [15]) размещена непосредственно внутри прибора, температура волокна измеряется точечным электрическим датчиком температуры. Для определенности, далее будем называть подобную конструкцию опорной катушки термостатом с пассивной стабилизацией температуры. Чаще всего таковой является сплайс-кассета с уложенным в нее кольцами оптическим волокном. Точечный электрический датчик температуры крепится с обеспечением непосредственного контакта с оптическим волокном. Такая система обладает очевидными преимуществами по простоте, однако измерение температуры с малой погрешностью и высокой повторяемостью предъявляет особые требования к конструкции этого узла. Опорную катушку термостата с пассивной тепловой стабилизацией в этом случае необходимо изолировать от влияния внешних температур (например, с помощью материалов большой теплоемкости), однако создание стабильного по температуре опорного участка оптического волокна гораздо эффективнее решит проблему корректного измерения температуры.

Для создания термостата с активной тепловой стабилизацией необходим источник нагрева и эффективный механизм поддержания заданного режима с минимальными отклонениями. Основным материалом при изготовлении термостата с активной тепловой стабилизацией должен быть материал с большой теплоемкостью и хорошо поддающийся механической обработке. Нами в данной работе был использован сплав алюминия Д16.

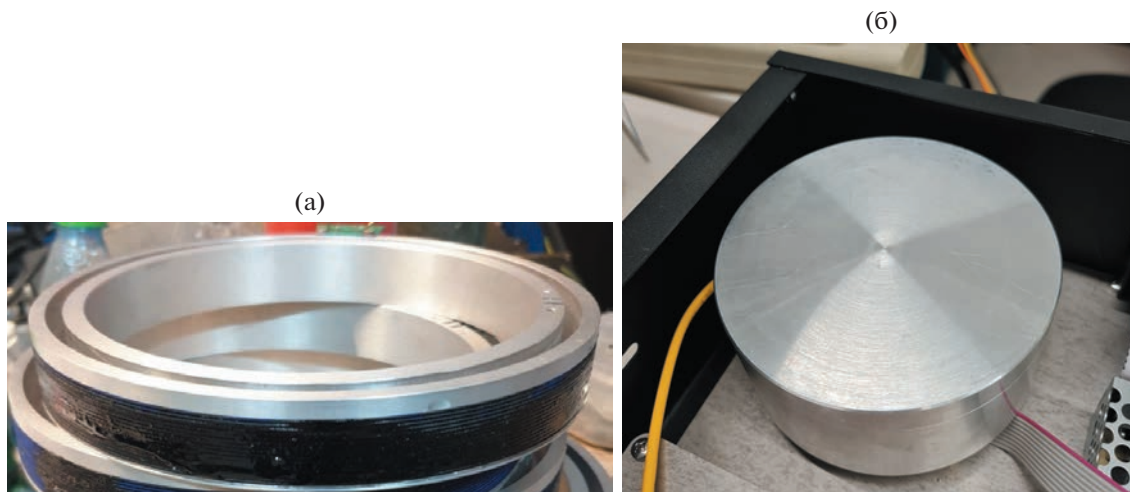


Рис. 1. Внешний вид: **а** — основания термостата, показана намотка проволоки из константана без установленного кольца с волокном; **б** — термостата с активной стабилизацией температуры в сборе.

В качестве источника нагрева использовалась проволока из константана — термостабильного сплава на основе меди (Cu) (около 59%) с добавкой никеля (Ni) (39–41%) и марганца (Mn) (1–2%). Проволока из константана была намотана на цилиндр корпуса термостата (рис. 1а), внизу которого выполнен паз для установки кольца из алюминия Д16 с намотанным в один слой оптическим волокном длиной порядка 50 м. Термический контакт цилиндрической поверхности внутреннего паза и кольца обеспечивался теплопроводящей пастой, что позволяло улучшить теплопередачу от внешней греющей намотки.

Для регулирования режима нагрева и поддержания температуры с заданной точностью был использован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) с обратной связью по температуре, который реализован с помощью программируемого микроконтроллера.

Термостат с активной стабилизацией температуры в сборе как составной узел распределенного ВОДТ показан на рис. 1б.

Одними из самых важных характеристик термостата с активной стабилизацией являются тепловая стабильность и время выхода на рабочий режим. Время выхода на рабочий режим всей приборной части распределенного ВОДТ определяется максимальным временем выхода на рабочий режим его составных узлов. На рис. 2 представлен график зависимости температуры опорного оптического волокна от времени. Согласно графику, время выхода от начальной комнатной температуры на стабильный режим поддержания температуры 70°C опорного участка оптического волокна составляет в среднем около 40 мин.

Исследовалась тепловая стабильность разработанного термостата. После выхода ПИД-регулятора на режим поддержания температуры 70°C были записаны с частотой дискретизации 1 Гц значения датчика температуры (платиновый термометр сопротивления класса А). На рис. 2 представлены результаты измерения. Тепловая стабильность термостата с активной стабилизацией за час измерений составила порядка $\pm 0.04^\circ\text{C}$.

Было проведено экспериментальное исследование влияния флуктуаций температуры опорного участка оптического волокна на абсолютную погрешность измерения температуры распределенным ВОДТ. Сравнивались метрологические характеристики двух распределенных ВОДТ (по схеме на рис. 3) с активным термостатированием опорного участка при разных тепловых стабильностях температуры: $\pm 0.04^\circ\text{C}$ (высокая стабильность) и $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (низкая стабильность). Измерения проводились независимо друг от друга. Порядок проведения измерений включал расчет абсолютной погрешности измерения температуры распределенным ВОДТ для трех значений времени усреднения: 3, 10 и 60 мин — при трех температурах: -50 , $+50$ и $+120^\circ\text{C}$.

Для распределенного ВОДТ с низкой тепловой стабильностью опорного участка была проведена серия из 20 измерений с продолжительностью каждого измерения 3 мин. В течение каждого измерения записывались с частотой 1.3 Гц значения температуры опорного участка оптического волокна, что позволило наблюдать флуктуации температуры. График зависимости температуры от времени для первых пяти (из 20) измерений распределенным ВОДТ показан на рис. 4. Согласно графику, в отдельных измерениях изменение температуры опорного участка оптического во-

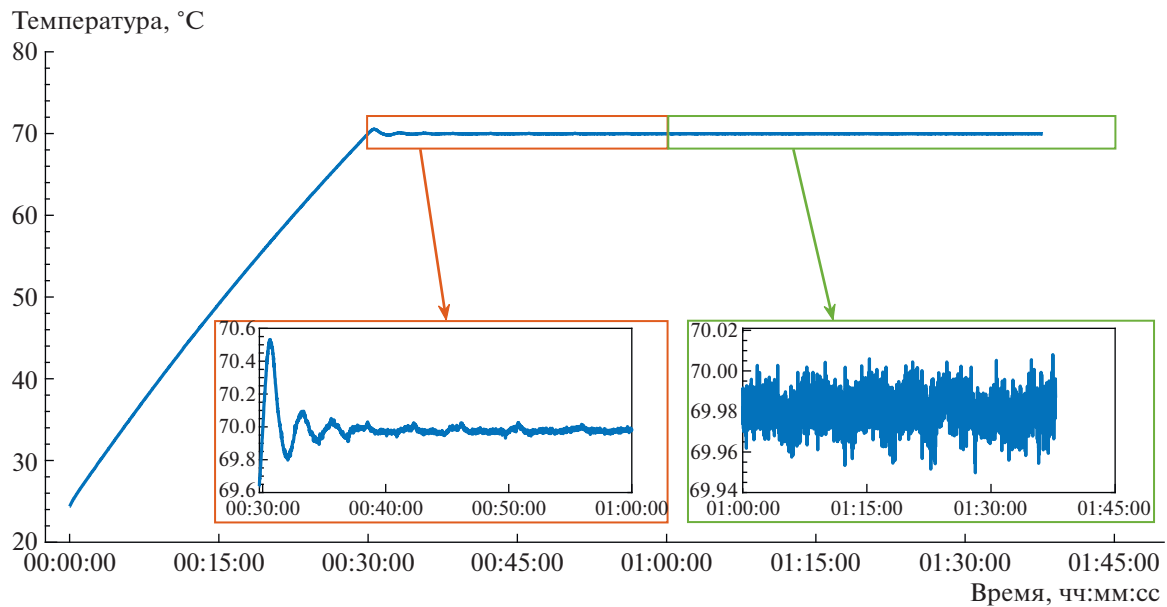


Рис. 2. График зависимости температуры опорного участка оптического волокна от времени. Показан выход термостата на рабочий режим. На вставках: результат измерения тепловой стабильности в начале процесса стабилизации (слева) и после выхода на режим (справа).



Рис. 3. Схема распределенного волоконно-оптического датчика температуры.

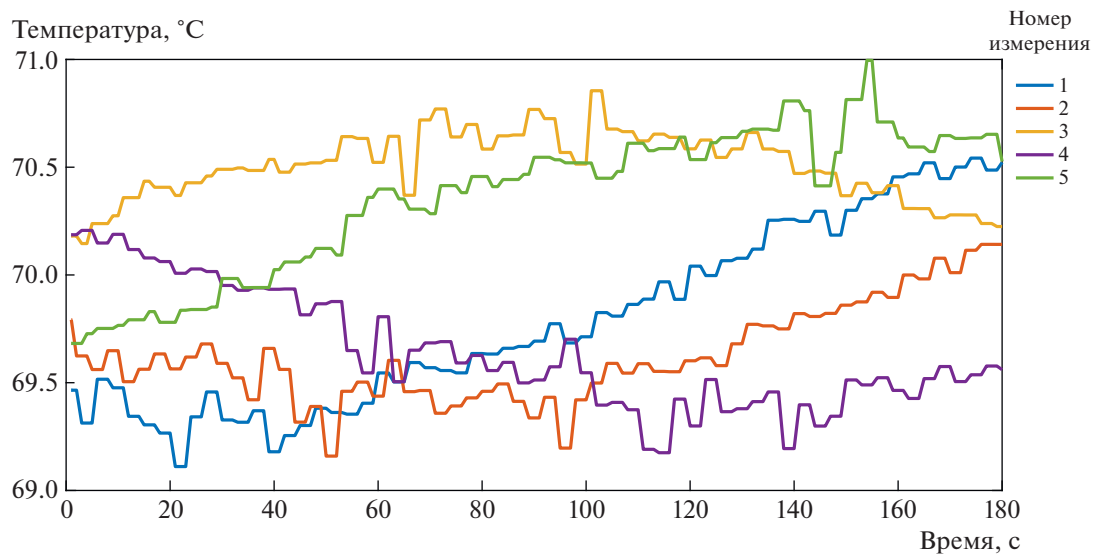


Рис. 4. Временные графики зависимости температур опорного участка оптического волокна при проведении первых пяти измерений продолжительностью 3 мин каждое.

локна относительно начала измерения может составлять порядка 0.5°C .

Процесс измерения с помощью распределенного ВОДТ требует проведения большого коли-

чества усреднений для повышения отношения сигнал/шум. Кроме того, для расчета распределения температуры вдоль волоконной линии также необходимо знание температуры опорной катуш-

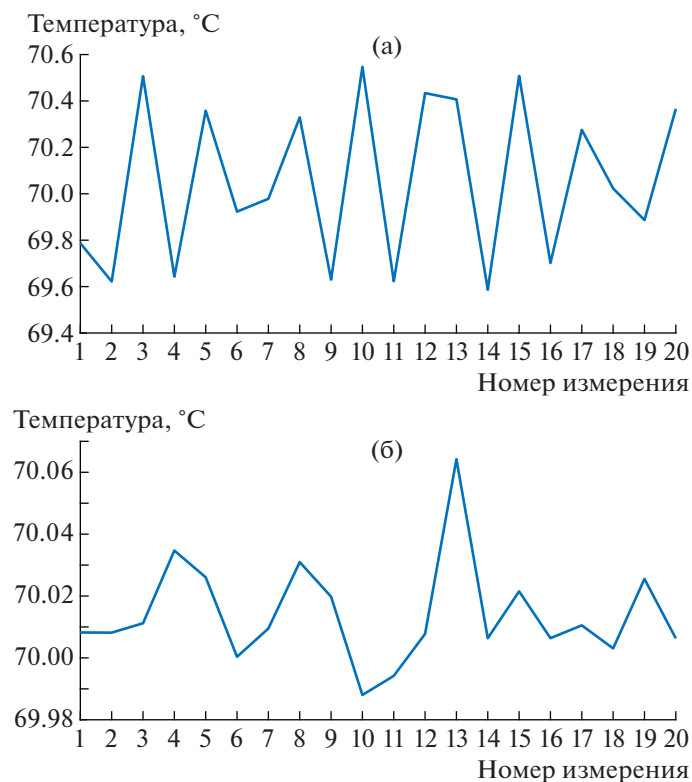


Рис. 5. Графики усредненных по каждому из 20 одинаковых по времени измерений температур опорного участка оптического волокна для распределенных ВОДТ с низкой (а) и высокой (б) тепловыми стабильностями опорного участка оптического волокна.

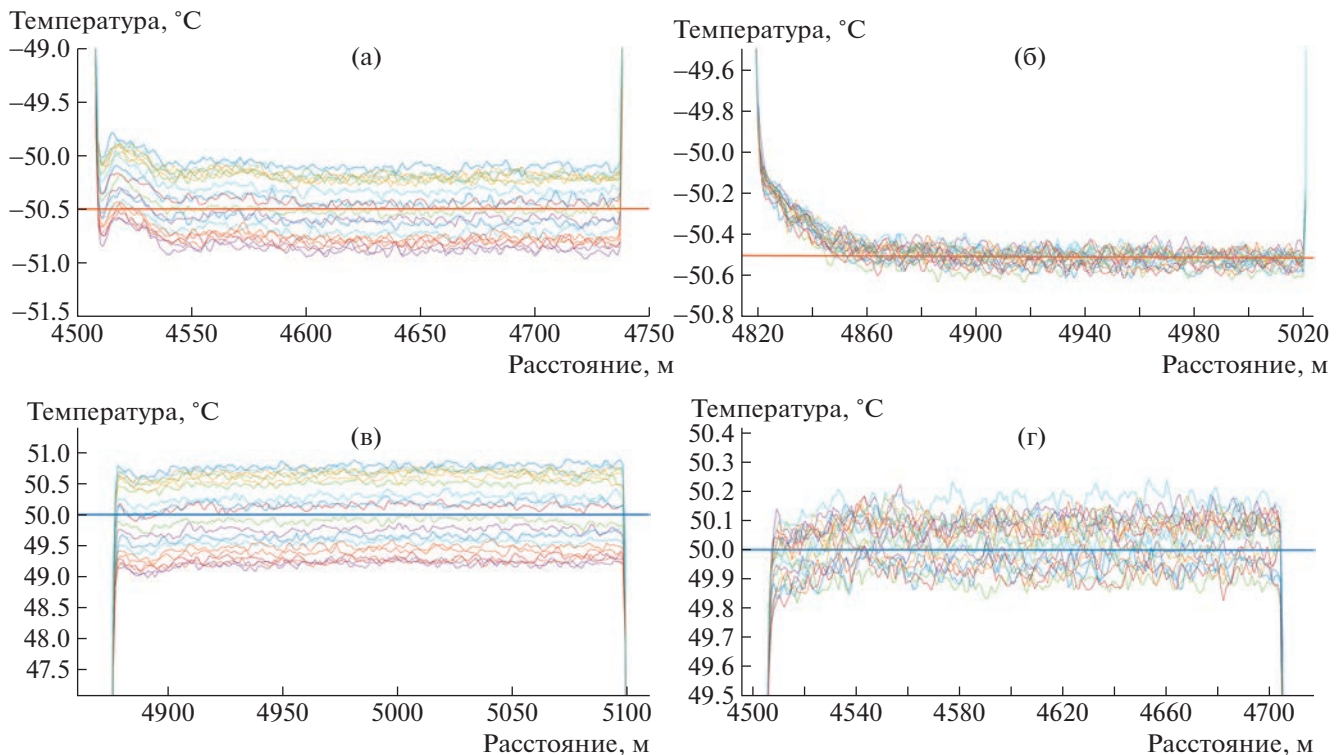


Рис. 6. Изменение измеренных распределенными ВОДТ температур участков оптического волокна, погруженных в переливные прецизионные термостаты, относительно средних температур -50.49°C (а, б) и $+50.02^{\circ}\text{C}$ (в, г) для распределенных ВОДТ с низкой (а, в) и высокой (б, в) стабильностями температуры опорных участков.

ки, которая обычно вычисляется как средняя температура за весь цикл измерения. Однако изменение температуры катушки в течение цикла может привести к возникновению погрешности измерения.

На рис. 5 представлены графики усредненных по каждому из 20 одинаковых по времени измерений распределенным ВОДТ температур опорного участка оптического волокна. Согласно рисунку, для распределенного ВОДТ с низкой тепловой стабильностью опорного участка оптического волокна изменение температуры относительно заданного значения 70°C составило $\sim \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (рис. 5а), а для распределенного ВОДТ с высокой тепловой стабильностью опорного участка $\sim \pm 0.04^{\circ}\text{C}$ (рис. 5б).

На рис. 6 показано изменение измеренных распределенными ВОДТ температур вдоль участков оптического волокна, погруженных в переливные прецизионные термостаты, относительно заданных температур -50°C (рис. 6а, 6б) и $+50^{\circ}\text{C}$ (рис. 6в, 6г). Результаты измерений на данных участках были использованы при расчете погрешности измерения в соответствии с ГОСТ Р 59166-2020 «Оптика и фотоника. Датчики температуры волоконно-оптические распределенные. Методы испытаний». Диаграммы на рис. 7 демонстрируют результаты вычисления погрешности из-

мерения температуры двумя распределенными ВОДТ для каждого из погруженных в термостаты участков оптического волокна при -50°C (рис. 7а) и $+50^{\circ}\text{C}$ (рис. 7б). Из диаграмм следует, что погрешности измерения температуры распределенным ВОДТ с высокой тепловой стабильностью опорного участка оптического волокна оказываются более чем в 4 раза ниже по сравнению с распределенным ВОДТ с низкой тепловой стабильностью опорного участка при одинаковом времени измерения.

Таким образом, использование термически стабилизированного участка оптического волокна уменьшает абсолютную погрешность измерения распределенным ВОДТ и улучшает повторяемость измерений, однако важно при этом обеспечить минимизацию флуктуаций температуры опорного участка оптического волокна.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

А.О. Чернуцкий, К.И. Кошелев — идея исследования, проведение экспериментов, обсуждение результатов; Т.В. Гриценко, А.А. Жирнов — обсуждение результатов, написание статьи; Р.И. Хан — сборка экспериментального стенда, проведение измерений; А.Б. Пнев — обсуждение результатов, координация исследования.

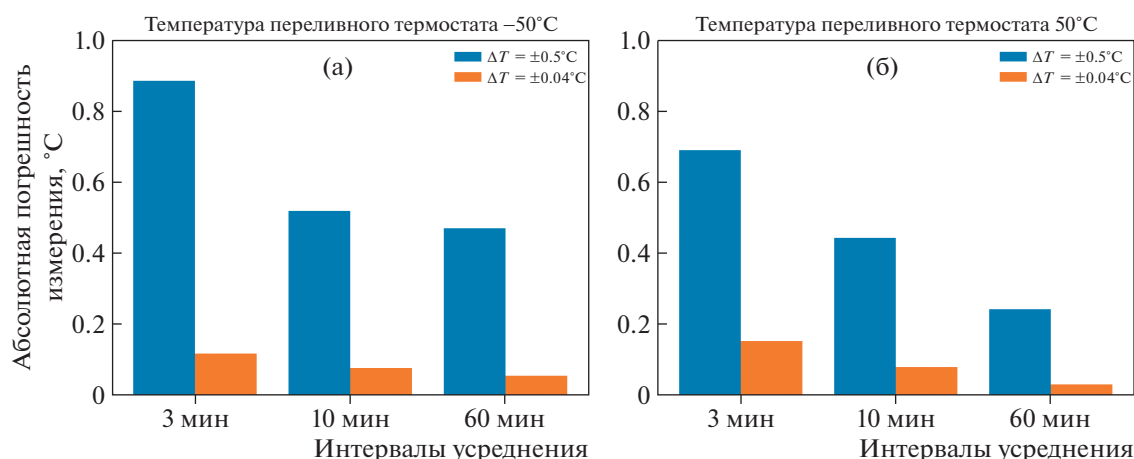


Рис. 7. Абсолютная погрешность измерения температуры распределенным ВОДТ для трех различных значений времени усреднения (3, 10, 60 мин) при разных тепловых стабильностях опорного участка оптического волокна: $\Delta T \approx \pm 0.04^\circ\text{C}$ – для термостата с высокой стабильностью и $\Delta T \approx \pm 0.5^\circ\text{C}$ – для термостата с низкой стабильностью. Погрешность рассчитана для двух значений температур из рабочего диапазона измерения РВОДТ: -50°C (а) и $+50^\circ\text{C}$ (б).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00225.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dakin J.P., Kahn D.A. // Optical and Quantum Electronics. 1977. V. 9. P. 540.
2. Rozzell T.C., Johnson C.C., Durney C.H., Lords J.L., Olsen R.G. // Journal of Microwave Power. 1974. V. 9. № 3. P. 241.
<https://doi.org/10.1080/00222739.1974.11688922>
3. Morey W.W., Meltz G., Glenn W.H. // Fiber Optic and Laser Sensors VII. International Society for Optics and Photonics. 1990. V. 1169. P. 987.
<https://doi.org/10.1117/12.963022>
4. Brooks J., Wentworth R., Youngquist R., Tur M., Kim B., Shaw H. // Journal of Lightwave Technology. 1985. V. 3. № 5. P. 1062.
<https://doi.org/10.1109/JLT.1985.1074308>
5. Hartog A.H., Leach A.P., Gold M.P. // Electronics Letters. 1985. V. 21. № 23. P. 1061.
<https://doi.org/10.1049/el:19850752>
6. Hartog A. // Journal of Lightwave Technology. 1983. V. 1. № 3. P. 498.
<https://doi.org/10.1109/JLT.1983.1072146>
7. Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. Electronics Letters. 1985. V. 21. № 13. P. 569.
<https://doi.org/10.1049/el:19850402>
8. Culverhouse D., Farahi F., Pannell C.N. // Electronics Letters. 1989. V. 25. № 14. P. 913.
<https://doi.org/10.1049/el:19890612>
9. Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Sazonkin S.G., Choban T.V., Koshelev K.I., Chernutsky A.O., Pnev A.B., Novikov A.O., Yagodnikov D.A. // Sensors. 2021. V. 21 (23). P. 7836.
<https://doi.org/10.3390/s21237836>
10. Chernutsky A.O., Dvoretzkiy D.A., Orekhov I.O., Sazonkin S.G., Ososkov Y.Z., Denisov L.K., Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Pnev A.B., Karasik V.E. // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). Russia, St. Petersburg. IEEE, 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285857>
11. Ososkov Y.Z., Chernutsky A.O., Dvoretzkiy D.A., Sazonkin S.G., Kudelin I.S., Orekhov I.O., Pnev A.B., Karasik V.E. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. P. 664.
<http://sci-hub.tw/10.1134/S0030400X19100199>
12. Stepanov K.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., Koshelev K.I., Pnev A.B., Lopunov A.I., Butov O.V. // Sensors. 2020. V. 20. P. 6431.
<https://doi.org/10.3390/s20226431>
13. Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., Abu-Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. // Sensors. 2022. V. 22 (7). P. 2677.
<https://doi.org/10.3390/s22072677>
14. Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC press, 2017.
<https://doi.org/10.1201/9781315119014>
15. Hausner M.B., Suárez F., Glander K.E., Van de Giesen N., Selker J.S., Tyler S.W. // Sensors. 2011. V. 11. № 11. P. 10859.
<https://doi.org/10.3390/s111110859>