

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

**посредством
волоконно-оптических датчиков**

Ю.Ларин, д.т.н., ОАО "ВНИИКП"
Ю.Смирнов, к.т.н., ООО "НПП "Старлинк"

Проблема создания сверхпроводящих высоковольтных кабелей лежит, казалось бы, вне сферы интересов представителей мира телекоммуникаций. Тем не менее, в статье рассматриваются методы контроля температуры на основе оптоволоконных датчиков температуры – вполне телекоммуникационного объекта. Развертывание подобных систем может представлять практический интерес для традиционных игроков рынка систем связи.

Поведение оптического волокна (ОВ) и датчиков температуры в диапазоне от -60 до 200°C достаточно хорошо исследовано. Однако имеются значительные по важности и объему области техники, в которых эксплуатация различных объектов происходит при низких и сверхнизких температурах (космические аппараты, системы охлаждения, сверхпроводящие линии передачи энергии и пр.). Эта область применения ОВ и устройств на их основе малоизученна и содержит достаточно много интересных аспектов.

Устойчивая работа высоковольтных сверхпроводящих кабелей (СПК) в значительной степени зависит от контроля температуры хладагента (жидкого азота), протекающего по специальным каналам внутри СПК. Чтобы обеспечивать режим сверхпроводимости, необходимо поддерживать температуру внутри СПК ниже критической. Вследствие разных причин в СПК могут возникать локальные зоны нагрева, которые приведут к выходу системы из строя. В при-

нципе, возможен распределенный по длине кабеля или локальный нагрев, который следует ожидать в неопределенном месте по всей строительной длине кабеля.

Перегрев СПК требует экстренного отключения кабеля от источника электрической энергии или принудительного увеличения охлаждения. Чтобы прогнозировать возникновение такой ситуации, необходимы средства контроля температуры по всей длине кабеля. В качестве такого распределенного датчика можно использовать оптические волокна.

Из существующей номенклатуры датчиков (табл.1) для измерения особо низких температур наиболее подходят два типа датчиков – точечные брегговские датчики и распределенный датчик измерения температуры по анализу рамановского рассеивания.

В работах [2, 3] рассматривалось применение многомодового ОВ в качестве распределенного датчика для измерения температуры протяженных объектов, в том числе

и силового кабеля. Такие решения уже используются в практических задачах. Однако в большинстве случаев диапазон измерения температур находился в области, близкой к нормальным условиям эксплуатации.

В работах [4, 5] приводятся сведения об использовании оптических датчиков на основе решетки Брегга в градиентных ОВ для измерения напряжений при температуре жидкого гелия (-240°C). ОВ призвано заменить тензометрические датчики. В качестве измерительного прибора в этих работах использован оптический рефлектометр (OFDR), работающий на принципе измерения релеевского рассеивания, что значительно упрощает технику измерения.

Более интересны варианты применения спектральной аппаратуры, в основе которых могут быть использованы специализированные анализаторы оптического спектра на тех же брегговских решетках или другие анализаторы оптического спектра. Они могут быть приспособлены как для измерения температуры, так и величины механических деформаций последовательности из 10–20 отдельных датчиков (квази-непрерывные датчики). При этом, при использовании специальных волокон, рабочий диапазон температур может быть от -120 до 500°C (максимально допустимая температура от 0 до 900°C) [6].

В практическом плане очень важно разработать технологию непрерывного изготовления брегговских решеток непосредственно при вытяжке волокон или в процессе перемотки волокна. Это позволит изготавливать оптические кабели-датчики. Такие работы проводятся [4], но пока не реализованы в промышленном масштабе.

Для температурного мониторинга СПК применялась уже отработанная схема, использующая рамановское рассеивание в стандартных кварцевых многомодовых ОВ (50/125 мкм). Она позволяет уверенно

регистрировать сигнал обратного рассеяния по длине ОВ на расстоянии до 10 км. В измерительную систему входят электронный блок (оптический рамановский измеритель обратного рассеяния) и сенсорные элементы – ОВ.

Первичная задача заключалась в исследовании поведения многомодового кварцевого ОВ в условиях криогенных температур при многократном локальном охлаждении. Вторичная задача касалась непосредственно проведения испытаний с целью определения возможностей измерения температуры сверхпроводящего кабеля, работающего при температуре жидкого азота, методом рамановской рефлектометрии. Необходимо было оценить разрешающую способность подобного датчика по температуре и длине, а также повторяемость результатов в идентичных условиях.

Испытания проводились по следующей методике (рис.1). От катушки с многомодовым ОВ длиной 1800 м отматывалось 50 м ОВ и сматывалось в две бухты длиной 30 м (бухта №1) и 20 м (бухта №2). Диаметр бухт – около 10 см. Бухта №1 длиной 30 м помещалась в сосуд с жидким азотом емкостью 5 л, затем проводилось измерение температуры. Весь измеряемый участок состоит из холостого участка (катушка №3) длиной около 1800 м; внутриприборного участка ОВ; участка ОВ, помещенного в сосуд Дьюара (катушка №1) и конечного участка ОВ (катушка №2). Общая длина ОВ – около 1850 м. Катушка с основной длиной ОВ расположена непосредственно на лабораторном столе рядом с прибором.

Основные температурные изменения происходят в бухте №1 – на дальнем конце волокна перед последним участком.

В качестве измерителя рамановского обратного рассеивания использовался прибор ИДОВ-1 производства Института информационных технологий (Минск).

Таблица 1. Классификация волоконно-оптических датчиков температуры по принципу действия и оценка их возможностей [1]

Структура	Измеряемая физическая величина	Используемое физическое явление, свойство	Детектируемая величина	Оптическое волокно	Параметры и особенности измерений
Датчики с оптическим волокном в качестве линии передачи					
Проходящего типа	Температура	Изменение поглощения полупроводников	Интенсивность пропускаемого света	Многомодовое	-10...300°C (точность ±1°C)
Проходящего типа	Температура	Изменение постоянной люминесценции	Интенсивность пропускаемого света	Многомодовое	0–70°C (точность ±0,04°C)
Проходящего типа	Температура	Прерывание оптического пути	Интенсивность пропускаемого света	Многомодовое	Режим "вкл./выкл."
Антенного типа	Температура	Инфракрасное излучение	Интенсивность пропускаемого света	Инфракрасное	250–1200° С (точность ± 1%)
Датчики с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента					
Интерферометр Фабри-Перо	Температура	Тепловое сжатие и расширение	Фаза световой волны (полиинтерференция)	Одномодовое	Высокая чувствительность
Последовательного и параллельного типа	Распределение температуры и деформации	Обратное рассеивание Релея	Интенсивность обратного рассеивания Релея	Многомодовое	Разрешающая способность 1 м

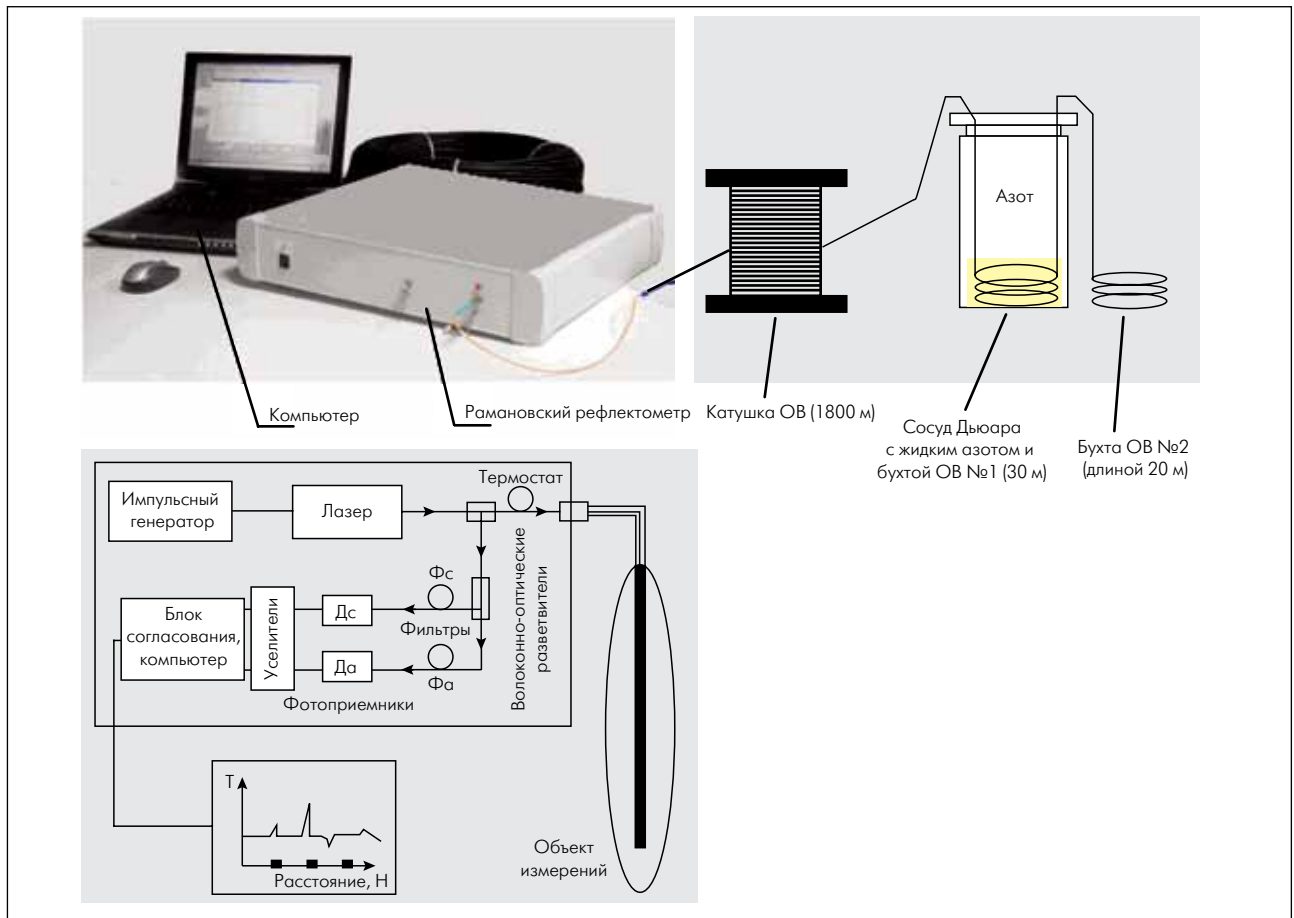


Рис.1. Схема испытаний волоконно-оптического датчика

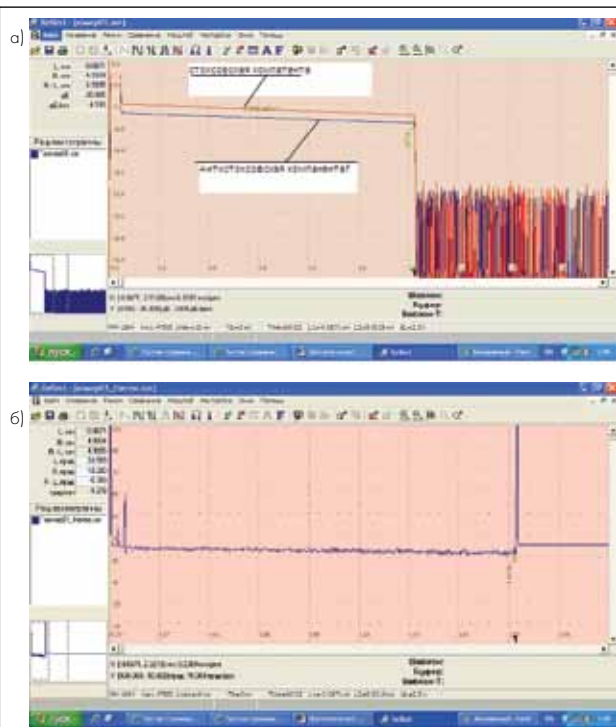


Рис.2. Рефлектограмма рамановского излучения перед началом испытаний в нормальных условиях: а – в области катушки №1, б – по всей длине ОВ

Прибор позволяет измерять зависимость обратнорассеянного излучения по длине подсоединяемого световода $[A = f(l)]$ с разрешающей способностью 2,5 м для данного типа ОВ. Это позволяет различать два и более участка с нагревом или охлаждением, длина которых составляет 2,5 м и расстояние между которыми должно быть не менее 2,5 м. Точность измерения температуры – не хуже $0,2^\circ\text{C}$ (на первых километрах от начала). При уменьшении длительности измерений и удалении места измерений от начала ОВ (в области 5–10 км) чувствительность измерений уменьшается до $1\text{--}1,5^\circ\text{C}$. Максимальная длина измеряемого участка ОВ – до 10 км.

Измерялись стоксовская и антистоксовская компоненты рамановского рассеивания (рис.2). Длительность измерений составляла 1–1,5 с и задавалась включением источника излучения рефлектометра. Включение прибора синхронизировалось с заливкой сосуда Дьюара азотом.

Температурная зависимость волокна $T = f(\lambda)$, рассчитывалась и фиксировалась по всей длине (1850 м) ОВ. Она пропорциональна соотношению стоксовской и антистоксовской компонентам рамановского излучения. Исследуемый участок волокна далее представлялся в нужном масштабе. При этом измерялись температуры в двух точках – в зоне воздействия пониженных температур и в зоне бухты № 1.

Перед началом измерений обычно производится калибровка прибора по двум точкам кривой с известными значениями температуры.

Таблица 2. Результаты температурных испытаний макета датчика (последовательные этапы)

Расположение бухты ОВ длиной 30 м	Измеренная температура, °С
Вне сосуда с жидким азотом	17,5–20
Полностью погруженная в жидкий азот (измерение после выдержки в течение 1 с)	-233,4
В сосуде на поверхности жидкого азота	-142
В сосуде над жидким азотом в его парах (высота 5 см)	-145
В сосуде над жидким азотом в его парах (высота 20 см)	-65
Вне сосуда (через 15 с после выема)	13,5
Повторные погружения в жидкий азот (более 10 раз при выдержке 1–1,5 с)	Маркер А (синий): от -233,6 до -233,9 Маркер Б (красный): от -239,2 до -239,8
Полностью погруженная в жидкий азот (измерение после выдержки в течение 3 мин)	Маркер А (синий): от -233,6 до -233,9 Маркер Б (красный): от -239,2 до -239,8

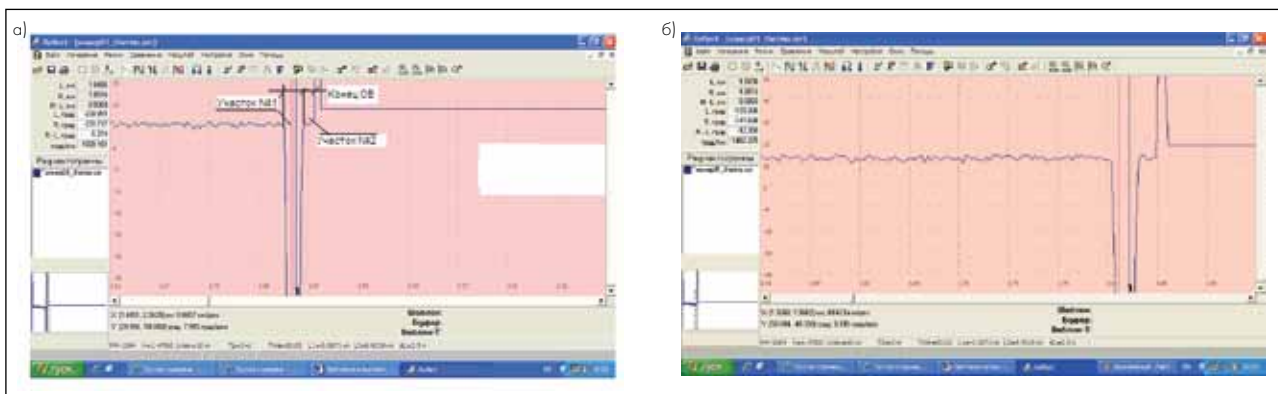


Рис. 3. Температурная зависимость оптического датчика на участке длиной 350 м: а – при погружении в жидкий азот, б – при его размещении на поверхности жидкого азота. Синий и красный маркеры расположены в зоне бухты №1 на расстояниях $L = 1845$ м и $R=1851$ м от начала ОВ, в данном случае температуры в этих точках: $-239,96^{\circ}\text{C}$ и $-233,73^{\circ}\text{C}$

тной температурой. В данном эксперименте калибровка не проводилась, так как необходимые исходные данные отсутствовали, а цель эксперимента заключалась в определении самой возможности измерения сверхнизкой температуры посредством многомодового ОВ.

Исходные зависимости (рамановские рефлектограммы), полученные после помещения бухты №1 в пустой сосуд Дьюара, приведены на рис.2. На последующих рисунках приведены данные измерения температуры на конечном отрезке ОВ длиной до 350 м (от 1500 до 1850 м), включающих в себя бухты №1 и №2. Измерения проводились непосредственно в жидком азоте (рис.3), на поверхности жидкого азота (рис.4) и при размещении бухты в парах жидкого азота (табл.2).

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный метод измерения сверхнизких температур может быть использован при разработке и исследовании конструкций сверхпроводящих кабелей.

Низкотемпературные специализированные датчики можно создавать на основе стандартного многомодового ОВ, соответствующего спецификации G.651. ОВ выдерживает многократные циклы охлаждения и нагрева без разрушения и необратимых изменений оптических и других характеристик. Повторяемость измерений достаточно для принятия этого метода за основу.

Безусловно, необходима доработка схемы измерений в части калибровки. Абсолютная погрешность измерений (разность между измеренной температурой и температурой жидкого азота) вследствие отсутствия процедуры калибровки составляет 30°C , в то время как колебания температуры в зоне бухты №1 составили около 2°C . Время измерений не превышало 2 с (в ручном режиме) и может быть уменьшено за счет программных средств.

Для последующих испытаний может быть использовано не просто ОВ, а специальные конструкции оптических кабелей-датчиков типа СЛ-ОКД-01 диаметром не более 2 мм (рис.5, табл.3). Такой кабель-

Таблица 3. Параметры кабелей СЛ-ОКМБ и СЛ-ОКД

Конструкция ОК, применяемые материалы	СЛ-ОКМБ-01	СЛ-ОКМБ-02	СЛ-ОКМБ-03	СЛ-ОКД-01	СЛ-ОКД-02
Число волокон	1–4	1–12	1–12	1–2	1–2
Внешний диаметр кабеля, мм	4,1	4,5	до 5,3	до 3	до 3
Масса 1 км кабеля, кг	до 28	45–62	39–79	до 25	до 25
Минимальный радиус изгиба, мм	50	50	50	30	30
Растягивающее усилие, кН	1,5	2,5	до 7	до 1	до 2,5
Раздавливающее усилие, кН/см	0,5	0,5	до 1,5	до 1	до 1

датчик имеет броню из стальных проволок и может быть встроен с СПК в нужную по сечению точку. Стальная броня обеспечит быструю передачу тепла от хладагента (азота) непосредственно в волокно. Это уменьшит время реакции системы на изменение температуры.

СПК имеет сложную и плотную конструкцию. Для защиты чувствительного элемента в виде ОВ от механических воздействий можно использовать

конструкцию специального миниатюрного бронированного безмодульного оптического кабеля типа СЛ-ОКМБ (см. рис.5). Этот кабель имеет прочное стальное гибкое покрытие из проволок и может использоваться с любым типом ОВ, выпускаемого по спецификациям G.651–G.657. Полимерное покрытие может быть выполнено из любого материала или вообще не использоваться. Диаметр кабелей по броне – от 2,8 до 3,7 мм. Эти кабели при малых габаритах и массе могут включать до 12 ОВ и уже используются в обычных волоконно-оптических линиях связи.

Авторы выражают глубокую признательность директору по направлению – заведующему отделением сверхпроводящих кабелей и проводов, д.т.н. В.С.Высоцкому за огромную поддержку в разработке системы оптического датчика для измерения сверхнизких температур, а также коллективу сотрудников отделения, принимавших непосредственное участие в испытаниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров П.А. Оптическая обработка информации. Реферат. – <http://www.topreferat.ru/s0/i4770.html>.
2. Малай А.В., Малай В.А., Смирнов С.Ю., Смирнов Ю.В., Бобров В.А., Лузгин А.Т., Ларин Ю.Т. Система температурного мониторинга на волоконно-оптических кабелях. – Фотон-экспресс, 2008, № 5-6 (69–70), с.28–31.
3. Гринштейн М.Л., Смирнов Ю.В., Ларин Ю.Т. Применение с системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля. – Кабель, 2009, № 8, с.48–53.
4. Sidney G. Allison, William H. Prosser, David A. Hare, Thomas C. Moore and W. Scott Kenner. Optical Fiber Distributed Sensing Structural Health Monitoring (SHM) Strain Measurements Taken During Cryotank Y-Joint Test Article Load Cycling at Liquid Helium Temperatures. – NASA Langley Research Center, <http://ntrs.nasa.gov>.
5. P.Saidireddy, R.L.N Sai Prasad, K.S.Narayana, D.Sen Gupta, M.Sai Shankar. Teflon coated fiber bragg grating sensor response at cryogenic temperatures. – International Conference on Optics and Photonics CSIO, Chandigarh, India, 2009.

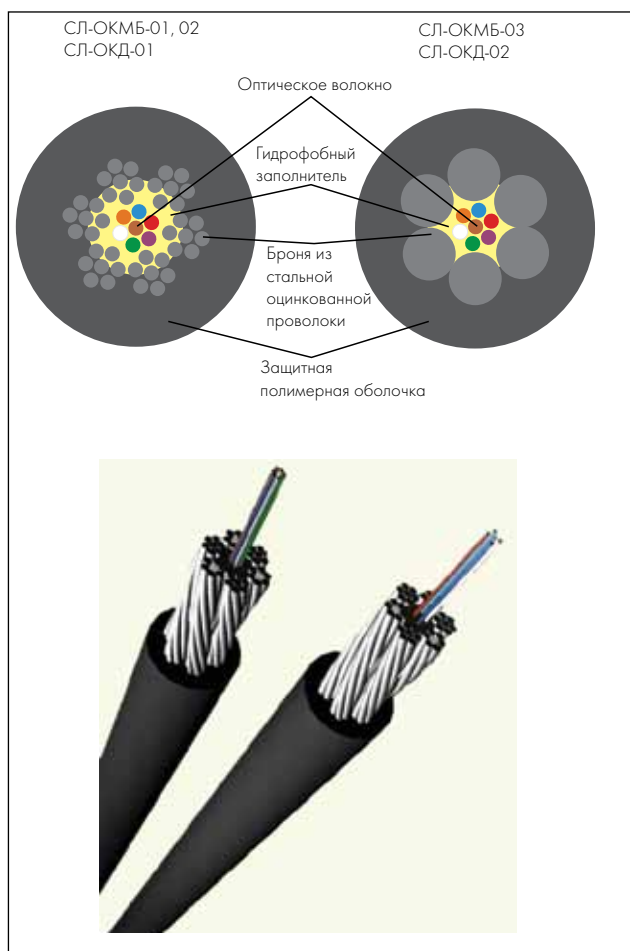


Рис.5. Конструкция оптического миниатюрного бронированного безмодульного кабеля типа СЛ-ОКМБ и кабеля-датчика СЛ-ОКД