

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко” Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения эластичных пенополиуретанов в подземных волоконно-оптических системах охраны периметра. Показана эффективность разработанных схем и методик измерения для регистрации фактов нарушения охраняемой территории при условии минимизации вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала.

Для защиты подходов к объектам или запретным зонам перспективным является использование волоконно-оптических сигнальных датчиков в системах охраны периметра. Сенсорные свойства оптического волокна обусловлены тем, что структура световой волны в волокне очень восприимчива к внешним воздействиям, которые могут модулировать амплитуду, фазу, модовый состав (спекл-структуру) или поляризацию волны [1]. К преимуществам волоконно-оптических систем можно отнести их нечувствительность к воздействию электромагнитных и радиочастотных помех, возможность работы при сложном рельефе местности, отсутствие электромагнитного излучения и активного электронного оборудования на охраняемом периметре, что затрудняет обнаружение с помощью поисковой техники.

Эксперименты по использованию традиционных методов регистрации нарушителей, применяемых в наземных волоконных системах охраны периметра, когда волокно размещается на упругих сетчатых заборах, при подземных испытаниях показали высокую сейсмочувствительность к посторонним паразитным воздействиям. Это приводило к резкому возрастанию вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала. Установлено, что наиболее достоверный способ фиксирования факта нарушения является непосредственное контактное воздействие при нахождении нарушителя на охраняемой территории. Для решения данной задачи необходимо использовать специальную конструкцию чувствительного элемента. Как правило, для обеспечения высокой и однородной чувствительности, оптическое волокно укладывается на резиновые маты и сверху накрывается металлической сеткой [2]. Однако такая конструкция обладает рядом недостатков: с течением времени под воздействием окружающей среды резина теряет свои упругие свойства, вода вперемешку с пылью скапливается вокруг волоконного световода (ВС). Все это ведет к ухудшению чувствительности датчика. Кроме того, металлические детали легко обнаружить с помощью поисковой техники и демаскировать охранную систему.

Для устранения указанных недостатков была разработана новая конструкция чувствительного элемента (рисунок 1). В качестве упругой основы использовались полосы эластичного пенополиуретана (ППУ), геометрия которых повторяло контур расположения волоконного световода, сверху укладывалась каркасная двуслойная жесткая экструдированная георешетка из полипропилена с крупной ячеистой структурой 20×20 см, далее – стеклотканевая сетка с ячейками 2×2 мм и маскирующее покрытие. Основанием для всей конструкции служил перфорированный стеклопластик, который совместно с гравийной подложкой обеспечивал дренажную функцию. Шаг укладки оптического волокна и ППУ составлял 20 см, ВС располагается «змейкой», а георешетка устанавливалась посередине между витками ВС. Такая конструкция обеспечивала отсутствие «мертвых зон», нечувствительных к внешнему воздействию. По сравнению с обычно используемыми в качестве упругих элементов резиновыми матами применение полос из эластичного пенополиуретана обеспечивает следующие преимущества: способность долгое время сохранять упругие свойства, не разрушаться под воздействием изменяющихся условий окружающей среды; негигроскопичность вслед-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

ствие запекания наружного слоя и плотного прилегания к основанию; неподверженность разрушению под воздействием грызунов и бактерий; полосы имеют ширину, достаточную, чтобы на них уложить и закрепить оптоволокно, и не закрывают всю площадь охраняемой территории, что уменьшает общую стоимость устройства; остатки воды и мусора скапливаются на стеклопластиковом основании и не влияют на работоспособность системы.



Рисунок 1 – Конструкция чувствительного элемента волоконно-оптической системы охраны периметра

В лаборатории ФХПМ и ПОС НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработаны смесительно-заливочная установка и технология по автоматическому нанесению эластичных пенополиуретанов с различной твердостью по Шору по заданной траектории. Данная установка позволяла наносить полосы пенополиуретана на лист стеклопластика размером  $2,5 \times 2,0$  м с шагом 20 см. Погрешность позиционирования смесительной головки не превышала 1 мм. Скорость заливки равна 15 см/с, таким образом, время заливки стандартного листа составляла 3 мин. Твердость упругого элемента варьировалась подбором типа полиэфира, соотношением между полиэфирами и изоционатами, маркой отвердителя.

Проведены экспериментальные исследования величины деформации  $\Delta h$  волоконного световода, расположенного на пенополиуретановом упругом элементе (ПУЭ) в зависимости от упругих свойств элемента, количества точек деформации и воздействующей нагрузки (таблица 1). Высота ПУЭ  $h=1$  см, ширина  $l=1,5$  см, расстояние между полосами 20 см, диаметр трубки каркасной георешетки 8 мм. Твердость различных образцов ПУЭ определялась в единицах по Шору (А). Результаты экспериментов для одной  $N=1$  и двух точек деформации  $N=2$  ВС представлены в таблице 1. Все измерения проводились цифровым микрометром Mitutoyo, обладавшим в диапазоне измерений 0–25 мм погрешностью 1 мкм.

Таблица 1.

Величина деформации ВС при различных нагрузках для разной твердости ПУЭ

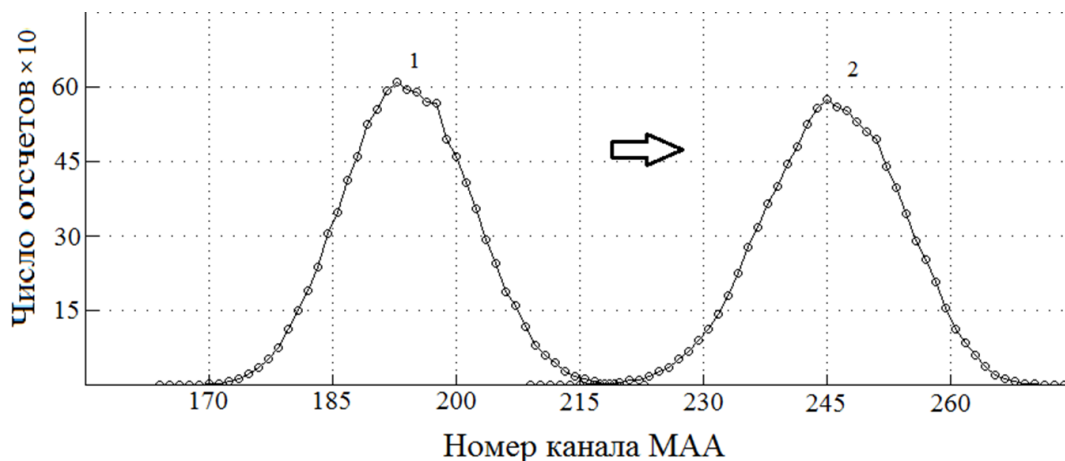
Нагрузка, кг	Твердость по Шору, $Sh_A=50$		Твердость по Шору, $Sh_A=60$		Твердость по Шору, $Sh_A=70$	
	$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$
	60	6,632 мм	4,705 мм	6,189 мм	4,393 мм	6,063 мм
72	7,148 мм	5,431 мм	6,672 мм	4,826 мм	6,368 мм	4,627 мм
85	7,496 мм	5,742 мм	6,914 мм	5,162 мм	6,476 мм	4,885 мм

На основе разработанного метода измерений с применением WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов создана структура подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа. Методика измерений основана на преобразовании изменений периода рециркуляции в изменение амплитуды электрического напряжения с помощью время-амплитудного преобразователя с последующей реги-

страцией смещения гистограмм распределения амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора (МАО). При этом, используя технологию спектрального мультиплексирования, каждому охраняемому сектору соответствовали периоды рециркуляции оптических импульсов на разных длинах волн.

Разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины поперечных макродеформаций волоконного световода с прямоугольным профилем показателя преломления, которая учитывает возникновение дополнительных потерь в зависимости от радиуса изгиба, угла изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку и параметров самого кварцевого волокна, с помощью которой получены теоретические зависимости времени задержки оптических сигналов от твердости упругой основы, воздействующей массы, количества точек деформации, пиковой мощности излучения и длительности фронта циркулирующих импульсов. Так, например, для идущего нарушителя массой 60 кг величина временной задержки составляла 840 пс при мощности лазера 3 мВт и значении фронта импульса на входе порогового устройства 5 нс, твердости пенополиуретанового упругого элемента по Шору 50. Данное значение превышало разрешающую способность измерительной системы, равную 400 пс, а, следовательно, это позволяло достоверно фиксировать факт нарушения периметра.

Для проверки полученных результатов провели исследования смещения гистограммы распределения амплитуд по каналам МАО с использованием разработанного экспериментального стенда при следующих параметрах: пиковая мощность импульса 3 мВт, фронт импульса 5 нс, воздействующая масса 60 кг, число точек деформации волокна 2×2 (имитировали распространение излучения по волокну в прямом и обратном направлении), твердость пенополиуретановой основы по Шору 50, цена одного канала МАО 20 пс (рисунок 2). Результирующее смещение гистограммы оказалось равной 1020 пс, что на 22 % больше, чем расчетные значения. Полученные данные с точки зрения регистрации нарушения являются положительным фактом, поскольку увеличивается чувствительность системы с теоретической 14 пс/кг до экспериментальной 17 пс/км.



1 – недеформированное волокно, 2 – волокно под воздействием деформации

Рисунок 2 – Экспериментальные исследования смещения гистограмм распределения амплитуды по каналам МАО для идущего нарушителя

Полученные теоретические и экспериментальные данные подтверждают эффективность применения разработанной методики регистрации фактов нарушения охраняемой территории как для идущего, так и для ползущего нарушителя.

#### Список литературы

1. Введенский, Б.С. Подземные датчики для охраны периметра / Б.С. Введенский // Алгоритм безопасности. – 2012. – № 1. – С. 6–13.
2. Оптоэлектронная распределенная сигнальная система / Кульчин Ю.И. [и др.] // Измерительная техника. – 2005. – № 7. – С. 28–32.