

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1993

УДК 681.586 : 621.372.8.029.7

А. А. Вербовецкий, Е. А. Зимоглядова, И. А. Шилов
(Москва)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Приведены структурные и конструктивные особенности датчика давления, работа которого основана на изгибах оптических волокон. Даны экспериментальные характеристики датчика, полученные при варьировании различных его параметров для разных оптических волокон: ступенчатых многомодовых, градиентных и одномодовых.

Введение. Успешное развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) привело к интенсивному развитию датчиков и преобразователей физических величин, использующих в своей работе сигналы той же природы, что и сами линии связи, т. е. оптическое излучение. В настоящее время существует значительная промышленная потребность в оптических датчиках для работы в условиях взрывоопасности, высокой радиации, сильных электромагнитных полей, высоких температур, а также в системах охранной сигнализации.

В общем случае совместно с ВОЛС могут быть применены: волоконно-оптические датчики, использующие световоды в качестве чувствительной среды; оптические датчики, выполненные не на основе волоконных световодов (последние используются лишь для подвода и отвода световой энергии); неоптические датчики, требующие наличия дополнительного преобразователя «выходной сигнал — оптическое излучение», который в случае ВОЛС должен рассматриваться как неотъемлемая часть датчика.

Наиболее интересным представляется применение датчиков первых двух типов. Среди используемых принципов действия оптических схем модуляции следует отметить изменение отражения или пропускания среды, нарушение полного внутреннего отражения, управляемую связь волноводов, изменение поглощения среды (амплитудная модуляция), изменение длины ячейки или оптической длины среды, поперечных размеров волновода (фазовая модуляция), поворот плоскости поляризации и изменение типа поляризации (поляризационная модуляция), смещение края полосы поглощения и изменение длины волны излучения (частотная модуляция) [1].

Следует отметить, что наиболее удобной для дальнейшей обработки выходного сигнала оптического датчика является амплитудная модуляция света; кроме того, большинство схем амплитудной модуляции не требует использования когерентного излучения.

В данной работе рассматриваются структурные, конструктивные особенности и экспериментально исследуются характеристики волоконно-оптического датчика давления с амплитудной модуляцией, которая не предъявляет практически никаких специальных требований ни к источнику, ни к приемнику излучения и не нуждается в дополнительной схеме, обрабатывающей выходной сигнал датчика, так как амплитудно-модулированный сигнал непосредственно регистрируется с помощью обычного фотоприемника.

Структурные и конструктивные особенности волоконно-оптического датчика. В основу работы датчика положена способность волоконно-

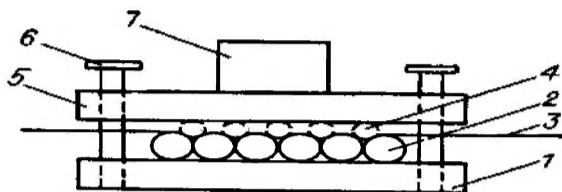


Рис. 1

оптических световодов изменять пропускание оптического канала при изменении его геометрии [2, 3]. Этот принцип модуляции света использовался при построении датчиков перемещения, гидрофона и т. д. [4].

Волоконно-оптический датчик изображен на рис. 1 (1 — основание, 2 — нижний валик, 3 — волокно, 4 — верхний прижимной валик, 5 — верхняя планка, 6 — винты, 7 — груз). Пропускание в данном случае изменяется при возникновении изгибов (или микроизгибов) световода. Уменьшение выходной мощности при приложении усилия осуществляется за счет индуцированного микроизгибами преобразования мод и последующего выхода энергии мод высших порядков в оболочку и окружающую среду, что приводит к ослаблению выходного оптического сигнала.

Для экспериментов была изготовлена специальная конструкция датчика (см. рис. 1), позволяющая изменять его параметры в широких пределах. Вся конструкция датчика была выполнена из металла, при этом основание 1 и верхняя планка 5 имели размеры $190 \times 30 \times 10$ мм, а диаметр и количество валиков 2, 4, на которых световоды подвергались изгибам, варьировались соответственно от 8 до 1 мм и от 20 до 1 шт. В качестве источников излучения использовались: лампа накаливания, гелий-неоновый лазер ЛГ-52-3 с длиной волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм, лазерный диод и светоизлучательный диод с $\lambda = 1,3$ мкм (ЛД-1,3 и СИД-1,3). Измерения проводились с помощью оптического тестера «Электроника ОТ-6» и «ОМК-3-76». В качестве световода использовалось ступенчатое, градиентное и одномодовое волокно, при этом его длина на входе и выходе датчика ~ 500 м.

Ниже приводятся характеристики датчика, полученные при различных вариациях вышеприведенных его параметров.

Экспериментальные результаты. Схема экспериментальной установки для снятия нагрузочных характеристик волоконно-оптического датчика кроме датчика включала входную и выходную катушки волокна (с длиной волокна ~ 500 м каждая), которые были введены в схему не только для имитации рабочих условий эксплуатации, но и для уменьшения влияния оболочечных мод излучения на результаты эксперимента; источник и приемник излучения. Эксперименты показали, что использование в качестве источника излучения лампы накаливания и лазера ЛГ-52-3 с длиной волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм дает практически одинаковые результаты, поэтому ниже приведены характеристики, снятые при использовании в качестве источника излучения лазера ЛГ-52-3, а в качестве приемника излучения — фотоприемника тестера «Электроника ОТ-6».

На рис. 2 представлены зависимости относительной выходной световой мощности P/P_{\max} от нагрузки F на волокно при использовании в датчике ступенчатого волокна с соответствующими диаметрами сердцевины и оболочки $50/125/630$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,22$.

Зависимости были сняты при диаметре нижних валиков $D = 8$ мм, а диаметры d верхних валиков и их количество варьировались: для рис. 2, а — диаметры d верхних валиков были равны соответственно 8, 5, 3 мм, а цифра на графике — количество верхних валиков. На рис. 2, б приведены зависимости нагрузки от количества n верхних валиков при их диаметрах $d = 3$ (точки) и $d = 5$ мм (крестики) при уровне сигнала $P/P_{\max} = 0,5$.

Из графиков видно, что при использовании ступенчатого волокна датчик наиболее чувствителен к нагрузке при диаметре верхних валиков $d = 3$ мм

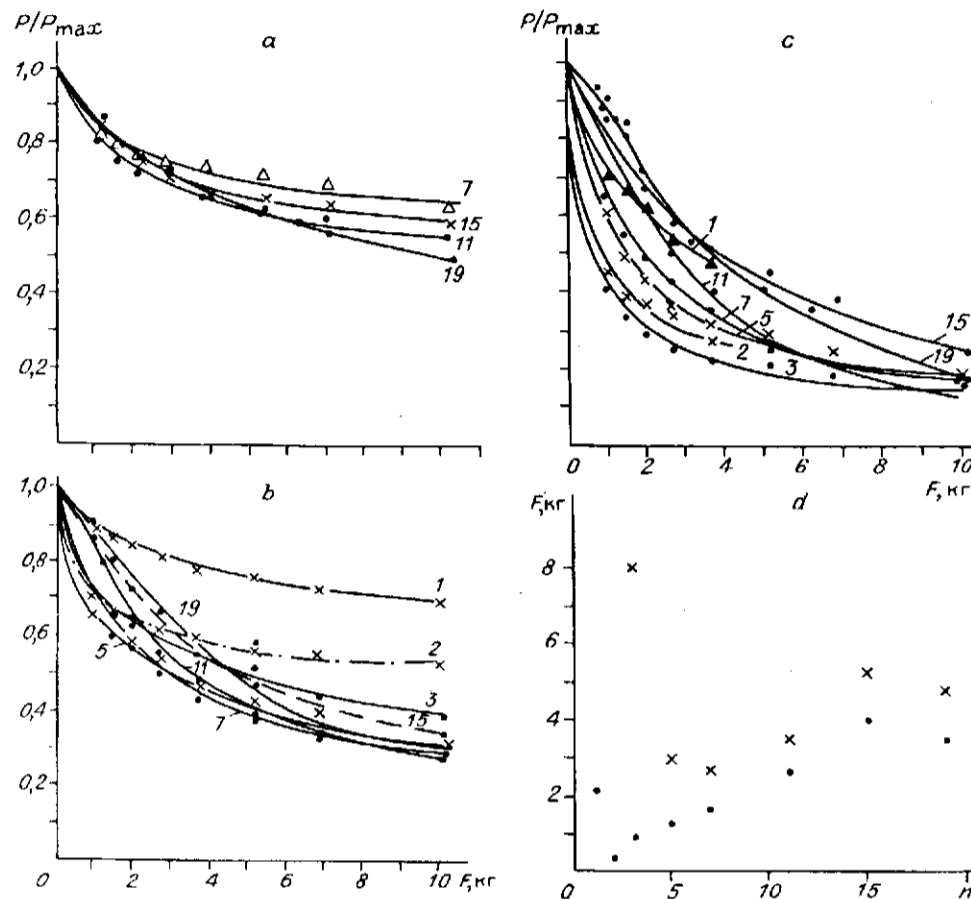


Рис. 2

($D = 8$ мм) и при их небольшом количестве, равном 2 или 3, однако более стабильные результаты получаются при трех верхних валиках (см. рис. 2, *d*). При этих параметрах датчика (см. рис. 2, *c*) спад выходной мощности на 50 % происходит при нагрузке на волокно 0,9 кг.

На рис. 3 изображены зависимости относительной выходной световой мощности P/P_{max} от нагрузки F на волокно при использовании в датчике градиентного волокна с соответствующими диаметрами сердцевины и оболочки 50/125/240 мкм.

Зависимости на рис. 3, *a*, *b* были сняты при диаметрах $D = 8$ мм и $d = 5$, 3 мм соответственно, а на рис. 3, *c* — при $D = 3$ мм, $d = 3$ (точки), 1,5 (треугольники), 1,0 мм (крестики). Из графиков рис. 3 видно, что при использовании градиентного волокна датчик наиболее чувствителен к нагрузке при $d = 3$ мм и $D = 8$ мм при количестве верхних валиков $n = 1-2$ шт. Так, при одном верхнем валике с $d = 3$ мм спад выходной мощности до 50 % происходит при нагрузке на волокно $F = 30$ г (при $D = 8$ мм, см. рис. 3, *c*) и $F = 50$ г при $D = 3$ мм (см. рис. 3, *d*). Из сравнения с аналогичными зависимостями для ступенчатого волокна (см. рис. 2, *c*) можно заключить, что датчик с градиентным волокном в 30 раз чувствительнее к нагрузке. На рис. 3, *d* приведены зависимости относительной выходной световой мощности P/P_{max} от нагрузки F на волокно при использовании в качестве источников излучения лазерных диодов ЛД-1,3 (точки) и светоизлучательных диодов СИД-1,3 (крестики) при $D = d = 3$ мм. Из графиков рис. 3, *d* видно, что при наибольшей чувствительности датчика при $n = 1$ эти зависимости практически совпа-

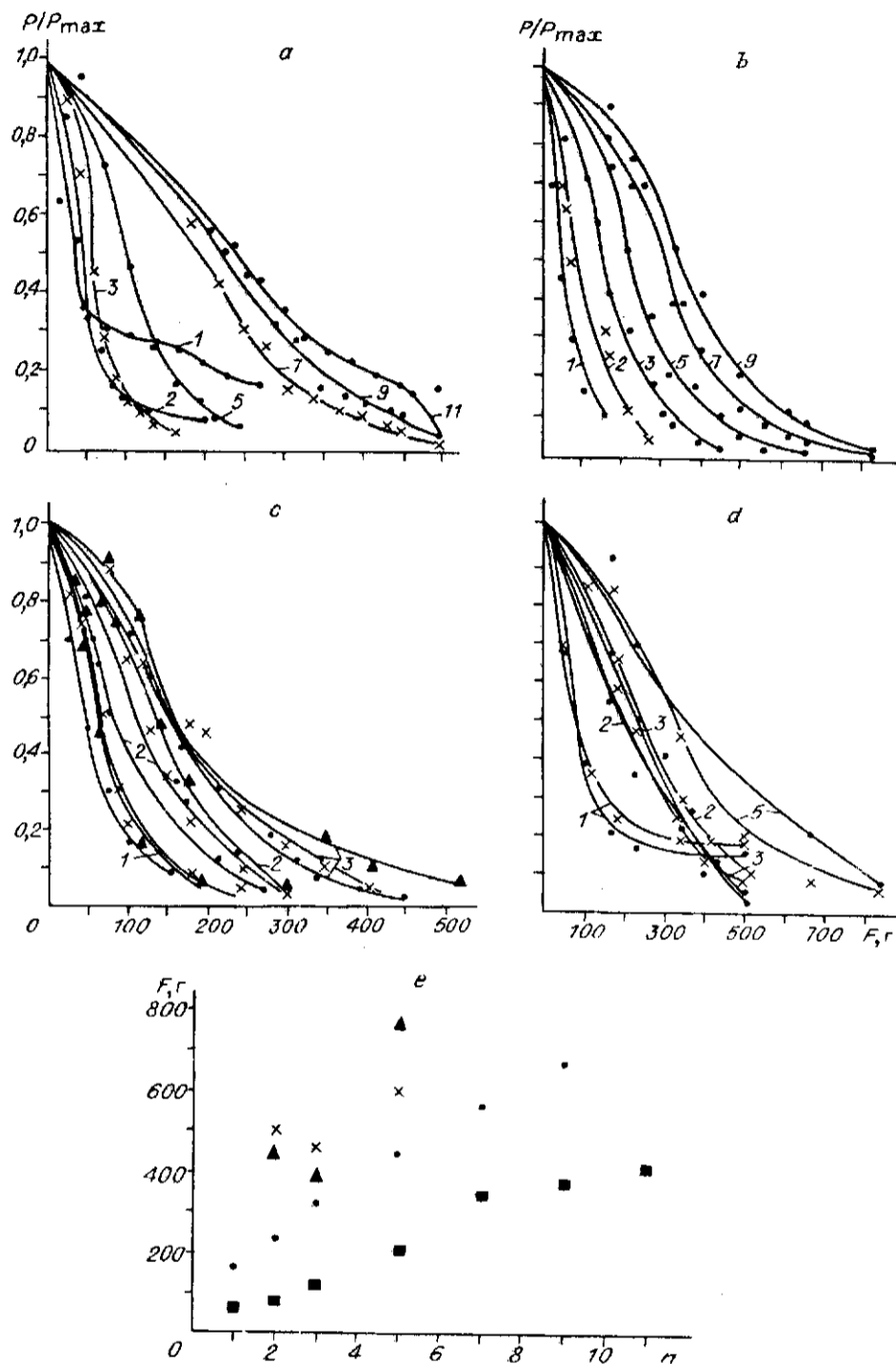


Рис. 3

дают и спад выходной мощности до уровня 50 % происходит при $F = 70$ г (это в 1,4 раза больше, чем для лазера ЛГ-52-3).

Зависимости нагрузки от количества верхних валиков при их диаметрах $D = d = 3$ мм и источниках излучения ЛГ-52-3 (точки), ЛД (треугольники) и СИД (крестики), а также при диаметрах $D = 8$ мм и $d = 3$ мм для источника

излучения ЛГ-52-3 (квадратики) представлены на рис. 3, *e* для уровня выходного сигнала $P/P_{\max} = 0,1$. Из зависимостей рис. 3 следует, что датчик наиболее чувствителен к спаду выходной световой мощности на 90 % (нагрузка $F = 70$ г) при излучении $\lambda = 0,63$ мкм (ЛГ-52-3), $D = 8$ мм, $d = 3$ мм и $n = 1$. При излучении $\lambda = 1,3$ мкм ($D = d = 3$ мм) наибольшая чувствительность к спаду выходной световой мощности на 90 % ($F = 400$ г) достигается при использовании ЛД-1,3 и $n = 3$, которая примерно в 3 раза меньше, чем для ЛГ-52-3 и $n = 1$ при $D = d = 3$ мм.

Градиентное волокно в датчике было подвергнуто испытаниям на надежность. В качестве источника и приемника излучения при испытаниях использовались соответственно ЛГ-52-3 и фотоприемник тестера ОТ-6, при этом $D = d = 3$ мм, $n = 2$. В процессе испытания датчик 1000 раз кратковременно нагружался силой $F = 336$ г, а затем эта нагрузка не снималась с датчика в течение 1 ч. Испытания показали, что выходной сигнал на уровне $P/P_{\max} = 0,05$ практически не меняется.

Следует отметить, что датчик на основе градиентного волокна имеет значительно лучшие характеристики по сравнению с использованным в работе многомодовым ступенчатым волокном. Это можно объяснить тем, что градиентное волокно имеет более тонкую и эластичную внешнюю защитную оболочку, которая поэтому легче подвергается микроизгибам на валиках, и, следовательно, при меньших нагрузках из сердцевины волокна выводится большая световая мощность в оболочку и окружающую среду.

На рис. 4 представлены зависимости относительной выходной световой мощности (P/P_{\max}) от нагрузки F на волокно при использовании в датчике одномодового волокна с соответствующими диаметрами сердцевины и оболочки 8,4/125,5/225,7 и числовой апертурой $NA = 0,11$. Зависимости на рис. 4, *a* были сняты при $d = 3$ мм и $D = 8$ мм (точки) и 3 мм (крестики) соответственно. Зависимости нагрузки от количества верхних валиков при их диаметрах $d = 3$ мм и $D = 8$ мм (точки), 3 мм (крестики) при уровне выходных сигналов $P/P_{\max} = 0,5$, а также при $d = 3$ мм и $D = 8$ (треугольники), 3 мм (квадратики) и $P/P_{\max} = 0,1$ приведены на рис. 4, *b*.

Из этих зависимостей (см. рис. 4) видно, что наибольшая чувствительность датчика достигается на уровне $P/P_{\max} = 0,5$ и $P/P_{\max} = 0,1$ при $n = 1$. При использовании одномодового волокна датчик наиболее чувствителен к нагрузке при диаметрах валиков $D = 8$ мм, $d = 3$ мм, при этом спад выходной мощ-

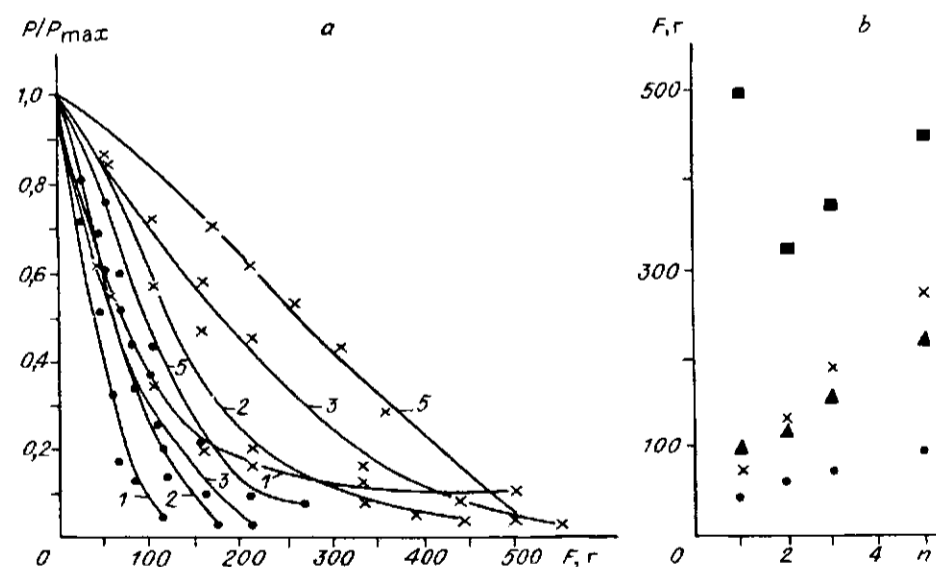


Рис. 4

ности на 50 % происходит при нагрузке на волокно в 45 г, т. е. при нагрузке, в 1,5 раза большей, чем для градиентного волокна.

Из сравнения зависимостей на рис. 2—4 можно заключить, что наивысшая чувствительность и надежность получена для датчика с градиентным волокном.

Заключение. Проведенные исследования подтверждают возможность создания простых по конструкции дистанционных волоконно-оптических датчиков давления. Отличительной особенностью таких датчиков является то, что они не производят электромагнитных наводок и помех, что, в частности, является причиной трудности их обнаружения, кроме того, они могут безопасно работать в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

На основе изложенных в данной работе экспериментальных результатов в зависимости от назначения, технических требований к датчику, а также имеющейся компонентной и производственной базы конструкция датчика может быть оптимизирована для конкретных условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. И., Семенов А. С., Удалов Н. П. Оптические и волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника.—1985.—12, № 5.
2. Smith M. S. RF field measurements using an optical fibre link // Fibre Optics Conf. Proc., N 53.—L.: Inst. of Electronic and Radio Engineers, 1982.—P. 53.
3. Патлах А. Л., Семенов А. С. Светопроектирование изогнутых многомодовых оптических волокон // Квантовая электроника.—1983.—10, № 4.
4. Гуляев Ю. В., Меш М. Я., Проклов В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение.—М.: Радио и связь, 1991.

Поступила в редакцию 22 мая 1992 г.