

УДК 681.586.5

К. А. Томышев, В. А. Баган, В. А. Астапенко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности

В статье отражено современное состояние измерительных систем в нефтегазовом комплексе, продемонстрированы преимущества оптоволоконных датчиков перед классическими. Рассматривается возможность создания системы распределенных волоконно-оптических датчиков давления. Предлагается использование физических свойств оптического волокна и влияния микроизгиба кабеля на эффект обратного рассеяния. Изложены способы увеличения достигнутых на лабораторном макете технических характеристик.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики давления, распределенные системы датчиков, эффект обратного рассеяния, измерительные системы в нефтегазовом комплексе, лабораторный макет.

Измерительные системы в современной науке и индустрии

Современная промышленность немислима без автоматизированных систем управления. Сложные конструкции и механизмы требуют постоянного контроля различных параметров протекающих процессов. Мониторинг состояния сложных инженерных сооружений и промышленных систем является неотъемлемой частью их повседневной эксплуатации. Для осуществления подобного контроля требуются датчики и системы контроля различных физических величин, таких как температура, механические деформации, давление и т.д.

В настоящее время на рынке измерительных систем и датчиков доминирующее положение продолжают занимать электронные измерительные технологии [1], которые предполагают преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал и последующую его обработку. Альтернативой подобному подходу является использование волоконно-оптических систем измерения, где измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передающийся по оптоволокну. Несмотря на стабильный рост рынка оптоволоконных датчиков (по данным маркетингового агентства Frost&Sullivan : 2,5 млрд долларов в 2004 году с ежегодным приростом 11% по всем отраслям промышленности) и очевидные преимущества над электронными технологиями (взрывобезопасность, невосприимчивость к электромагнитным помехам и высокую разрешающую способность) относительная доля оптоволоконных датчиков в общем рынке измерительных систем остается небольшой. Строго говоря, оптоволоконные датчики занимают лишь нишевые приложения там, где традиционные измерительные средства не могут быть использованы или их применение является затратным.

Стоит отметить две тенденции в настоящее время. Во-первых, бурное развитие смежных технологий: волоконно-оптической передачи информации, приема и обработки изображений с помощью цифровой фото- и видеоаппаратуры, микропроцессорной техники — что способствует развитию оптоволоконной измерительной техники и удешевлению технологии изготовления [2]. Во-вторых, промышленность и регулирующие органы предъявляют все более жесткие требования к условиям эксплуатации, а именно, требования на помехозащищенность, безопасность измерений, точность и пр. Именно этим критериям удовлетворяют оптоволоконные датчики. Как видно, эти две тенденции могут привести к ситуации, когда оптоволоконные измерительные системы составят конкуренцию традиционным электронным системам. Причем не только по рабочим характеристикам, но и по стоимости канала измерения.

Отметим общие достоинства оптических волокон [3]:

- широкополосность (предполагается до нескольких десятков терагерц);
- малые потери (минимальные 0,154 дБ/км);
- малый диаметр (не более 125 мкм);
- малая масса (приблизительно 30 г/км);
- эластичность (минимальный радиус изгиба 2 мм);
- механическая прочность (выдерживает нагрузку на разрыв примерно 7 кг);
- отсутствие взаимной интерференции (перекрестных помех типа известных в телефонии «переходных разговоров»);
- безиндукционность (практически отсутствует влияние электромагнитной индукции, а следовательно, и отрицательные явления, связанные с грозowymi разрядами, близостью к линии электропередачи, импульсами тока в силовой сети);
- взрывобезопасность (гарантируется абсолютной неспособностью волокна быть причиной искры);
- высокая электроизоляционная прочность (например, волокно длиной 20 см выдерживает напряжение до 10 000 В);
- высокая коррозионная стойкость, особенно к химическим растворителям, маслам, воде.

Волоконно-оптические технологии развиваются на протяжении последних 20-ти лет и привели к созданию новых устройств; оптоволоконных гироскопов, температурных сенсоров, акустических сенсоров, акселерометров и химических анализаторов. Применения данной технологии включают структурный мониторинг, построение военных систем, различные промышленные применения, спектрохимические измерения и охрану периметров.

Тенденции в нефтегазовом комплексе

Актуальной задачей нефтегазовой промышленности является переход к новым методам управления процессами освоения и разработки продуктивных месторождений. Одним из этих методов является «интеллектуализация» скважин [4]. Сравнительно недавно появился новый термин — «умная скважина» («smart well»). Этот термин означает, что подобная скважина работает в саморегулирующемся режиме, постоянно информируя на расстоянии, как она себя ведет, штатная ситуация или нет. Скважина в режиме реального времени «снимает» большой объем информации о грунтах, о растворах, о самой себе [5], [6]. Вся информация поступает в систему контроля и управления, которая может автоматически менять режим работы оборудования.

Благодаря разветвленной системе электронных датчиков и управляющих устройств «умные скважины» обеспечивают оптимальный технологический режим добычи нефти, что позволяет снизить себестоимость эксплуатации месторождений в среднем на 20%. В 2002 году в мире работали около 1000 таких скважин. Испытания первой российской скважины подобного типа были начаты в декабре 2002 года на Усть-Балыкском месторождении «Юганскнефтегаза».

При создании «умных скважин» потребовалась разработка принципиально новых методов и устройств для измерения разнообразных производственных параметров. Так, для всех

традиционных устройств характерно то, что с их помощью измеряют необходимую величину лишь вблизи той точки образца, детали, механизма, в которую помещен датчик. Для работы же «умной скважины» необходимо одновременно регистрировать показатели по всей ее длине. Подобные измерения стали принципиально возможными лишь с появлением концепции так называемых распределенных датчиков, имеющих большие линейные размеры. Конструктивно, ведётся разработка распределенных датчиков на основе оптических волокон. Изготовление подобных датчиков сформировалось как одно из технических направлений только в начале 1980-х годов. Тогда же появился и термин «волоконно-оптические датчики» («optical fiber sensors»). Таким образом, волоконно-оптические датчики — очень молодая область техники.

Сейчас эта технология открывает новые возможности для измерения широкого ряда параметров, таких как давление, температура, вибрация, поток и акустические поля в применении к мониторингу нефтегазовых скважин [7], [8]. К этому направлению был проявлен повышенный интерес, и некоторые типы оптоволоконных датчиков были продемонстрированы для применения в скважинах. Среди них распределённые температурные датчики для температурного профилирования, резонансные оптические датчики давления, интерферометрические точечные датчики давления и датчики на Брэгговских решётках для целого ряда параметров [9].

Основные типы оптоволоконных датчиков

Оптоволоконные датчики, исходя из принципа кодирования измеряемой информации, можно условно разделить на следующие большие группы [10]:

- фазовые — датчики, в которых используется высококогерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра;
- со спектральным кодированием — датчики, где, в отличие от чисто фазовых, используется источник излучения с широким спектром с возможностью анализа всего спектра;
- амплитудные — датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны;
- туннельные — датчики, где используется эффект туннелирования излучения через малый зазор;
- поляризационные — датчики, использующие информацию о поляризации световой волны;

Стоит отметить, что это не единственный способ классификации оптоволоконных датчиков. Можно провести классификацию по принципу действия:

- интерференционные (Майкельсона, Фабри—Перо, Маха—Цандера и т.д.),
- распределенные (обратное и прямое рассеяние),
- люминесцентные,
- на внутриволоконных решетках,
- комбинированные.

Также можно классифицировать датчики по локализации измеряемого параметра:

- точечные — датчики, отвечающие за измерения непосредственно в одной локальной точке;
- распределенные — сенсоры, представляющие результаты измерений вдоль протяженной системы, существенно большей, чем в точечном случае;
- квазираспределенные — представляют собой сеть точечных элементов, каждый из которых снимает показания в своей точке привязки.

В настоящее время рынок волоконно-оптических датчиков только начинает развиваться, однако интерес к нему растет чрезвычайно быстро. Выпускаемая продукция востребована в аэрокосмической и нефтегазовой отрасли [11]. Активно внедряет и инвестирует в волоконно-оптические измерительные системы военно-промышленный комплекс (особенно в США и Западной Европе).

Лабораторные испытания

В статье представлены результаты исследования создания распределённого волоконно-оптического датчика давления на базе стандартного телекоммуникационного одномодового оптического волокна SMF-28. Принцип работы датчика состоит в использовании физических свойств самого волокна, а именно — влияния оказываемого в некоторой точке давления на пропускную характеристику. В качестве основного измерительного прибора использовался рефлектометр [12] — прибор, работающий на эффекте обратного рассеяния. Прибор позволяет измерять уровень отраженного сигнала вдоль всей волоконной линии, благодаря чему мы можем наблюдать изменения сигнала одновременно в каждой конкретной точке волокна. Таким образом, описанный датчик является действительно распределённым.

На рис. 1 приведена структурная схема эксперимента. Диаметр исследуемого оптического волокна — 125 мкм, при общей длине линии 935 м, длина волны излучаемого сигнала — 1550 нм. В эксперименте производилось воздействие в точке 5 рис. 1. Длины участков: 1—10 м, 2—900 м, 3—25 м. Показания на рефлектометре снимались на участке 910 м—911 м.

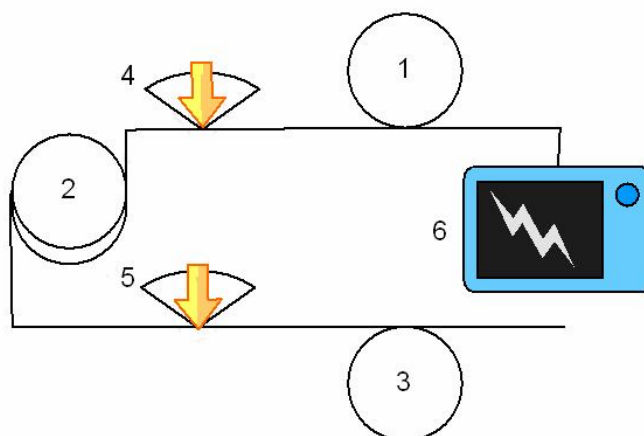


Рис. 1. Общая схема установки: 1 — оптическое волокно длиной 10 м, 2 — основная часть испытуемого волокна 900 м, 3 — волокно 25 м, 4,5 — тестируемые места микроизгибов, 6 — рефлектометр

Само по себе оптическое волокно не обладает чувствительностью к оказываемому давлению, поэтому было предложено техническое решение по трансформации нагрузки в микроизгиб волокна. На рис. 2 можно увидеть принципиальную схему оказания воздействия на оптическое волокно. Давление передается через металлические стержни диаметром 1 мм, под волокном находится упругая резиновая подкладка.

При оказании воздействия наблюдались два различных эффекта. Первый из них — значительное падение уровня рассеиваемого сигнала непосредственно сразу за точкой приложения давления, что связано с высвечиванием из волоконного кабеля. Создаваемый микроизгиб влечёт за собой изменения в апертуре части сигнала, при которых эта часть не может распространяться далее по данному оптическому волокну. В связи с этим эффект обратного рассеяния, мощность которого напрямую зависит от мощности передаваемого по кабелю излучения, также уменьшается. При значительном увеличении нагрузки падение сигнала выходит на постоянный уровень, что связано с конечной чувствительностью прибора.

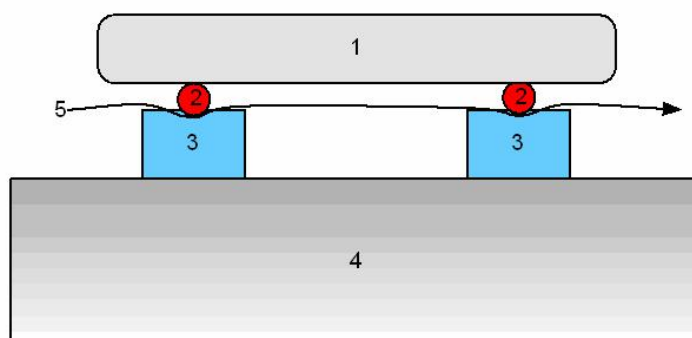


Рис. 2. Конструкция тестирования волокна на микроизгиб: 1 — нагрузка, 2 — металлический стержень толщиной 1 мм, 3 — упругая резина, 4 — стол

Второй эффект — отражение части сигнала от места нагрузки. Возникновение данного явления обусловлено слишком маленьким радиусом изгиба кабеля, что позволяет части передаваемого импульса отразиться в обратном направлении и внести свой вклад в принимаемую на фотоприемнике интенсивность. Этот эффект не наблюдается при небольших давлениях, когда радиус изгиба ещё недостаточно мал, однако при значительной нагрузке именно его предполагается использовать для измерения магнитуды воздействия, так как чувствительность прибора не позволяет нам использовать более первый эффект.

На рис. 3 отображена характерная картина, возникающая на экране рефлектометра. Участок рефлектограммы, на котором отражено резкое падение сигнала, относится к области приложения нагрузки. Как можно заметить, наклон характеристики в этой области почти вертикален, что позволяет локализовать воздействие с высокой точностью.

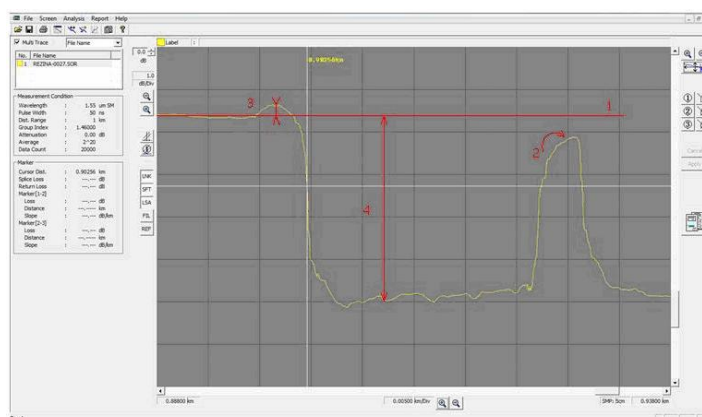


Рис. 3. Участок рефлектограммы вблизи места приложения давления: 1 — уровень сигнала при отсутствии нагрузки, 2 — пик отражения на конце волокна, 3 — разница сигнала по отражению, 4 — разница по высвечиванию

Пересчёт нагрузки в давление был выполнен с помощью программного пакета Abaqus,

в котором были воспроизведены условия проведения эксперимента. Данный программный пакет предназначен для проведения высокоточных вычислений механических напряжений и деформаций. В соответствии с условиями проведения эксперимента элементам модели присвоены необходимые физические параметры. Элементы модели нагружались по упругому закону, модуль Юнга резины был измерен экспериментально. В расчёте использовались основные свойства контактных взаимодействий элементов. Результатом расчёта стало вычисление механического напряжения в области контакта оптическое волокно — металлический стержень. Кроме того, была получена объёмная картина, отображающая распределение напряжения в каждой точке компьютерной модели. На рис. 4 представлены результаты трёхмерного моделирования. Более ярким участкам соответствует большее механическое напряжение. По результатам эксперимента был построен экспериментальный график (рис. 5), отражающий зависимость между величиной приложенного давления и разницей в показаниях рефлектометра. Следует отметить, что при дальнейшем увеличении нагрузки на волокно, разница в высвечивании сигнала уже не регистрируется прибором, так как уровень сигнала за точкой приложения давления становится слишком низким. Однако зависимость между ростом обратного отражения сигнала, вызванным сильным изгибом волокна, и давлением выходит на линейный участок. Таким образом, датчик имеет возможность регистрировать более высокое давление, не претерпевая никаких дополнительных изменений конфигурации.

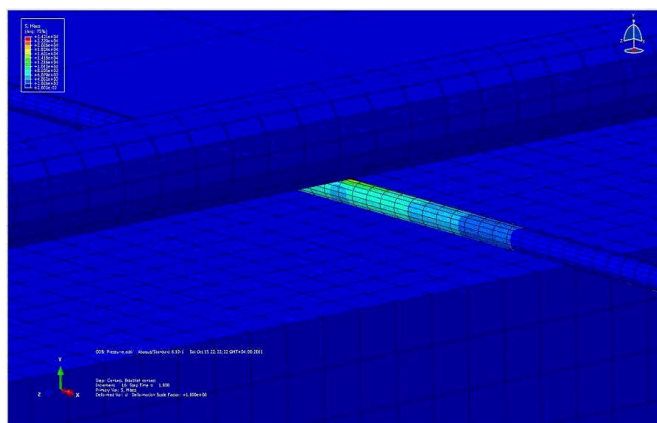


Рис. 4. Результаты трехмерного моделирования в программном пакете Abaqus

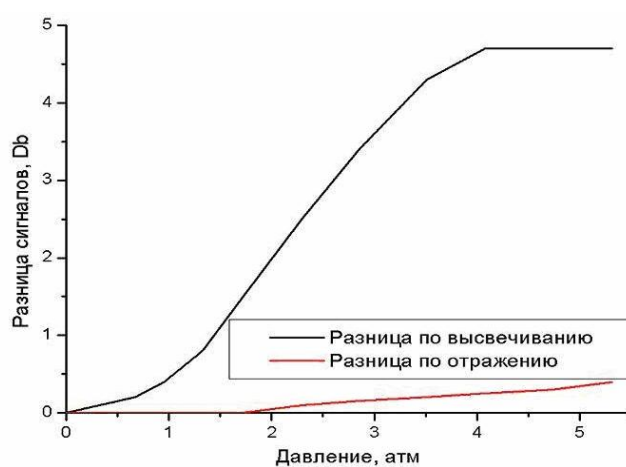


Рис. 5. Экспериментальный график зависимости между сигналом на рефлектометре и приложенным давлением

В ходе лабораторных исследований удалось получить разрешение 1 м при общей длине волоконной линии 935 м, что составляет 0,1 %. При этом чувствительность по давлению

составила 1 атмосферу. Следует отметить, что полученные технические характеристики можно улучшить на несколько порядков, так как они ограничены не чувствительностью волоконного элемента, а точностью лабораторного оборудования. При увеличении стабильности излучателя (в эксперименте участвовал суперлюминесцентный светодиод) станет возможным точнее локализовать воздействие, а увеличение мощности источника и чувствительности фотоприемника позволит измерять давление с меньшей погрешностью.

В ходе эксперимента было также проведено сравнительное исследование излученного и рассеянного сигнала. Сравнивались показания на рефлектометре в точке воздействия и показания на спектроанализаторе, подключённом к выходу волокна, т.е. две характеристики: рефлектометрическая и проходящая. Спектроанализатор не оснащён собственным источником сигнала, а потому может измерять только проходящий сигнал, излученный другим источником. Кроме того, спектроанализатор не имеет возможности измерения распределённых по пространству характеристик, т.е. все измеряемые параметры относятся к сигналу непосредственно на выходе из волоконной линии.

Спектр сигнала на выходе оптического волокна представлен на рис. 6. Как можно заметить, спектр сигнала достаточно широк, что вносит существенные погрешности в определение места приложения нагрузки. Кроме того, уровни сигнала на разных частотах непостоянны во времени, что говорит о непрерывном процессе перекачки энергии между различными частотными гармониками.

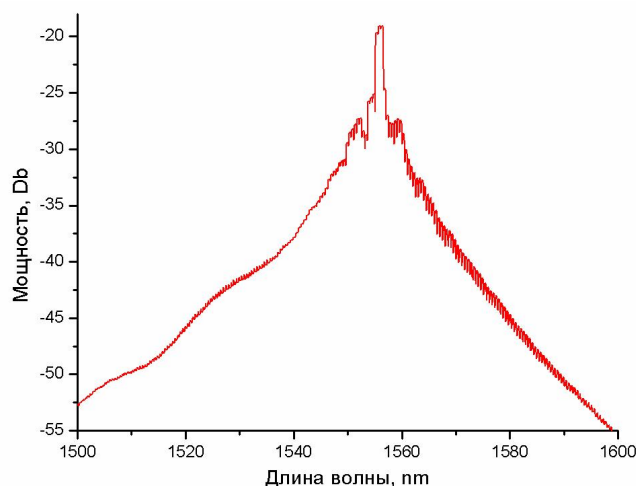


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе оптического волокна

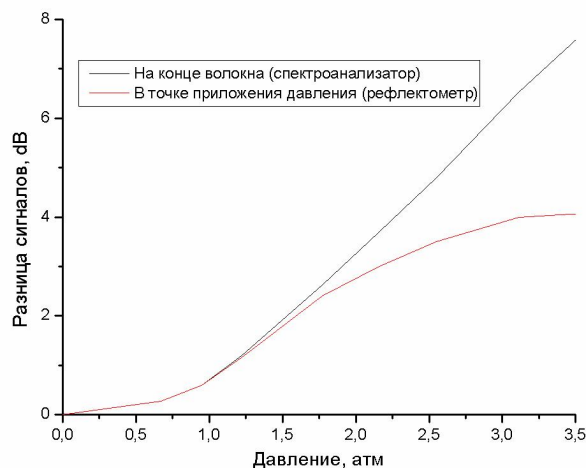


Рис. 7. Зависимость в изменении отраженного и проходящего сигнала от приложенной нагрузки

На рис. 7 приведена сравнительная характеристика данных, снятых с рефлектометра и со спектроанализатора. Спектроанализатор работал в режиме вычисления интегральной мощности сигнала на конце волокна. Значения на рефлектометре относятся к падению сигнала в нагруженной области.

Как видно из рисунка, при небольших давлениях разница сигналов на выходе волокна практически совпадает с разницей сигналов на участке локализации давления, однако при дальнейшем увеличении воздействия эти разности начинают значительно отличаться, что подтверждается при целостном изучении рефлектометрической характеристики. Разность сигналов на выходе волокна всегда совпадает с разностью сигналов на пике отражения от его торца на рефлектограмме, разность же в точке приложения давления становится меньше. Это связано с эффектами второго порядка, такими как отражение света от места микроизгиба.

Вывод

В статье предложена конструкция распределённого волоконно-оптического датчика давления и исследованы его характеристики.

Найдено и обосновано техническое решение, позволяющее измерять приложенную нагрузку и устанавливать область её локализации. Это решение опирается на физические свойства оптического волокна, используя изменения, вносимые микроизгибом в проходящий сигнал. Для измерения приложенной нагрузки использовался широко известный *эффект обратного отражения*, регистрируемый измерительным прибором — оптоволоконным рефлектометром. В ходе серии лабораторных испытаний были получены характеристические зависимости, связывающие измеряемые параметры с выходными данными измерительной аппаратуры. Для выполнения этой задачи использовался программный пакет Abaqus, в котором была промоделирована механическая часть эксперимента и произведены необходимые расчёты нагрузки. Удалось достичь разрешения в 1 м при общей длине волоконной линии 935 м, что составляет 0,1 %, а чувствительность по давлению составила 1 атм. Предложены способы существенного улучшения достигнутых технических характеристик, такие как увеличение мощности и стабильности источника сигнала и улучшение чувствительности фотоприемника.

Данный тип датчиков может найти широкое применение — прежде всего в нуждающейся в нём нефтяной промышленности. Измерение давления в режиме реального времени необходимо в обсадных трубах, внутри нефтепроводов, а также — при цементировании труб — для профилактики прорывов трубопровода. Круглосуточный анализ данных позволит оперативно обнаружить и локализовать начинающиеся утечки без проведения дополнительных поисковых работ, что особенно актуально на удаленных нефтегазовых месторождениях.

Литература

1. The business research and consulting firm «Frost & Sullivan» — www.frost.com.
2. Brian Culshaw. Optical fiber sensor technologies: opportunities and — perhaps — pitfalls. Lightwave Technologies.
3. «Concept Technologies» — www.c-tt.ru.
4. *Евдокимов И.Н.* Методы и средства исследований. — Московский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. Кафедра физики. Изд. «Отдел оперативной полиграфии РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина», 2004. 107 с.
5. *Zhao Yong, Liao Yanbiao, Lai Shurong.* Simultaneous measurement of down-hole high pressure and temperature with a bulk-modulus and FGB sensor // IFFE — Photonics Technology Letters. — 2002. — V. 14, N 11. — P. 1584–1586.

6. *Kragas Tor K., Williams Brock A., Myers Gregory A.* The optic oil field: deployment and application of permanent in-well fiber optic sensing systems for production and reservoir monitoring // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE 71529 (2001).
7. *Kersey Alan D.* Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry // Ieice trans. electron., V. E83-C, N 3, march 2000.
8. *McStay D., Shiach G., Nolan A., McAvoy S.* Optoelectronic sensors for subsea oil and gas production // Journal of physics: conference series 76 (2007).
9. *Inaudi D., Glisic B.* Fiber optic sensing for innovative oil and gas production and transport systems. — Smartec SA, Via Pobiette 11, CH-6928 Manno, Switzerland.
10. *Соколов А.Н., Яцеев В.А.* Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // Измерительная техника. LightWave. 2006. — № 4.
11. *Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодииков А.П., Поспелов В.И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. — 2005. — Т. 46, № 6.
12. *Воронин В.Г., Наний О.Е., Кулик А.А., Туркин А.Н.* Оптический рефлектометр: уч.-метод. пособие. — М.: МГУ, 2007. — 209 с.

Поступила в редакцию 21.12.2011.