

ПРОФИЛЕМЕТРИЯ ТРУБОПРОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА НА ЭФФЕКТАХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

УДК 622.69-79

Р.А. Закиров, Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) (Уфа, Республика Башкортостан, Россия), mrtutu@mail.ru

А.И. Салихов, к.т.н., УГАТУ, salikhovaydar@mail.ru

Р.Т. Магасумов, ООО «Газпром трансгаз Уфа» (Уфа, Республика Башкортостан, Россия)

В статье рассматриваются вопросы использования различных оптических волокон, их свойства и способы компоновки на сферическом и цилиндрическом профилемере для эффективного определения профиля трубопровода малого диаметра в целях предотвращения аварийных ситуаций на них. Приводится описание экспериментальной установки, подтвердившей реализуемость концепции и основные физические законы, объясняющие работу спроектированного оптического прибора. С помощью анализа математических моделей потерь на искажениях профиля трубы подбирается наиболее оптимальная составная часть профилемера, удовлетворяющая требованиям к чувствительным элементам профилемеров для современной внутритрубной диагностики, а теоретическое моделирование предложенных компоновок подтверждает возможность точного позиционирования и классификации отклонений в профиле трубопровода. Своевременная точная и интеллектуальная диагностика подобных отклонений поможет минимизировать риски долговременной эксплуатации региональных газопроводов и газопроводов-отводов магистральных участков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПРОФИЛЕМЕР, ТРУБОПРОВОД МАЛОГО ДИАМЕТРА, МАКРОИЗГИБЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА, ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.

В целях уменьшения рисков возникновения аварий и инцидентов на производственных объектах предприятий нефтегазовой отрасли одной из актуальных задач при эксплуатации газопроводов является повышение информативности диагностики и расширение сферы диагностируемых объектов. В частности, для выполнения внутритрубной диагностики (ВТД) газопроводов применяемые в настоящее время диагностические снаряды и профилемеры обладают протяженной формой, поэтому ВТД традиционно проводится на участках газопроводов, оснащенных камерами приема и запуска очистных устройств (КПЗОУ), представляющих сооружения, входящие в состав магистральных газопроводов (МГ).

На сегодняшний день региональные газопроводы и газопро-

воды-отводы на магистральных участках не оснащены КПЗОУ, соответственно, они не подвергаются ВТД. Учитывая тот факт, что средний срок эксплуатации многих существующих МГ (включая подземные) превышает 30 лет, возрастает актуальность их высокоинформативной диагностики.

Для обеспечения рачительной эксплуатации газотранспортных

систем и требований промышленной безопасности ставится задача разработки новой технологии мониторинга трубопроводов на основе компактного профилемера, оснащенного волоконно-оптическим сенсором, эффективного для диагностики газопроводов диаметром 100–300 мм и анализа работоспособности собранных экспериментальных образцов.

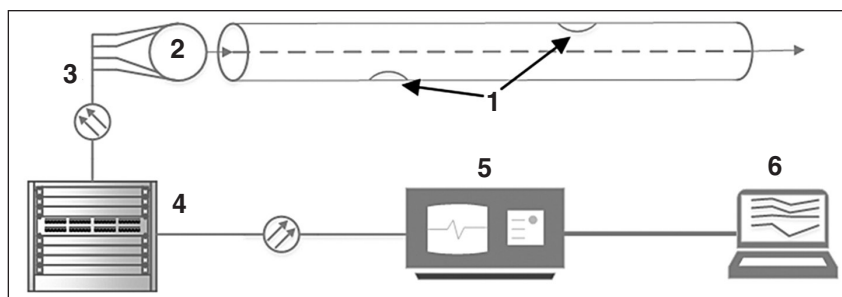


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – целевые элементы; 2 – сферический профилемер; 3 – оптическое волокно;
4 – оборудование WDM; 5 – спектроанализатор; 6 – обработка и визуализация данных на ПК

Zakirov R.A., Ufa State Aviation Technical University (USATU), e-mail: mrtutu@mail.ru (Ufa, The Republic of Bashkortostan, RF)

Salikhov A.I., USATU, e-mail: salikhovaydar@mail.ru

Magasumov R.T., Gazprom transgaz Ufa LLC (Ufa, The Republic of Bashkortostan, RF)

Profilometry with using properties of the optical fiber for small-diameter pipelines

The articles reviews the matters of using various optical fibers, their properties and composition methods on a spherical and cylindrical borehole geometry tool in order to effectively measure the profile of a small-diameter pipeline to prevent accidents on such pipelines. The description of the experimental facility that confirms that the concept can be implemented, and the main principals of physics that explain the operation of the designed optical tool, are presented. With the use of the analysis of mathematical models of distortion losses of the pipeline's profile, one selects the best component part of the borehole geometry tool that meets the requirements imposed upon sensitive elements of borehole geometry tools for modern inline diagnostics, and the theoretical modeling of the proposed compositions confirms that it is possible to accurately position and classify deviations in the pipeline's profile. Timely, accurate and intellectual diagnostics of such deviations will allow minimizing risks of long-term operation of regional gas pipelines and gas pipeline branches of main sections.

KEY WORDS: GEOMETRY TOOL, SMALL-DIAMETER PIPELINE, MACROBENDS OF OPTICAL FIBER, OPTICAL DEVICES.

Предлагаемая технология профилометрии для безопасной эксплуатации не требует наличия традиционных КПЗООУ в составе диагностируемого участка газопровода. В качестве КПЗООУ достаточно использовать камеры (устройства плавного пуска) типа II-УПП-1, которые могут быть установлены вместо или совместно с концевой запорной арматурой участка и, как правило, уже присутствуют на трубопроводах.

Для определения профиля предложена [1] и экспериментально подтверждена [2] концепция профиломера сферической формы с оптическими волокнами в качестве чувствительных элементов. На рис. 1 приводится схема экспериментальной установки.

В основе методики определения внутреннего профиля трубы лежат известные зависимости потерь в оптическом волокне от величины возникающего макроизгиба и длины волны оптического излучения. На рис. 2 изображен геометрический ход лучей при сдавливании сферической поверхности датчика под влиянием отклонения профиля трубопровода от ожидаемой величины.

Из соображений геометрической оптики потери в волокне объясняются законом Снеллиуса. Чем сильнее искривление волокна, тем больше энергии излуче-

ния оказывается в его оболочке. Критический угол определяется из выражения:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (1)$$

Величина показателя преломления сердцевин n_1 зависит от длины волны излучения и определяется экспериментально для каждой длины волны. Используются четыре различные длины волны для четырех соответствующих волокон, расположенных на поверхности шара.

При прохождении шаром участка с внутренним дефектом происходит потеря энергии на изгибе, отличающаяся на величину, функционально зависящую от размеров дефекта. Наблюдая за этими потерями, получаем полную картину изменений внутренней поверхности трубопровода.

В данной методике определения профиля к оптическим волокнам предъявляются требования,

противоположные требованиям, предъявляемым к современным оптическим волокнам в части затуханий на макроизгибах и зависимости показателя преломления от длины волны. То есть необходимо использовать волокно, свойства которого дают максимальную чувствительность к макроизгибам. С достаточной точностью потерю на макроизгибах для градиентного одномодового волокна можно оценить по следующей формуле:

$$\alpha = 10 \lg \left(1 - \frac{U+2}{2U\Delta} \times \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{0,16\lambda}{R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right), \quad (2)$$

где a – радиус сердцевины волокна; R – радиус макроизгиба; Δ – относительная разница коэффициентов преломления сердцевин и оболочки; λ – длина волны; U – показатель степени функции, описывающей профиль коэффициента преломления;

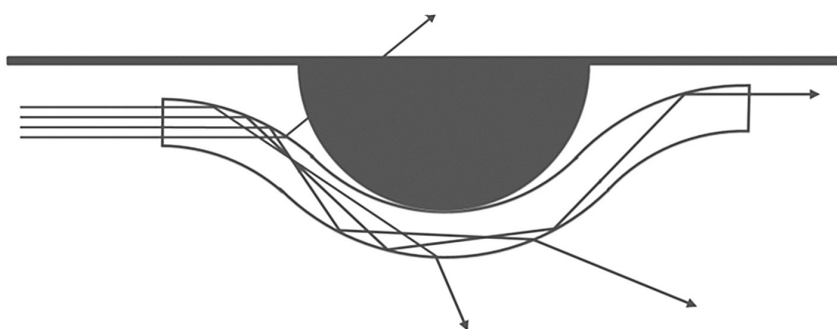


Рис. 2. Геометрический ход лучей

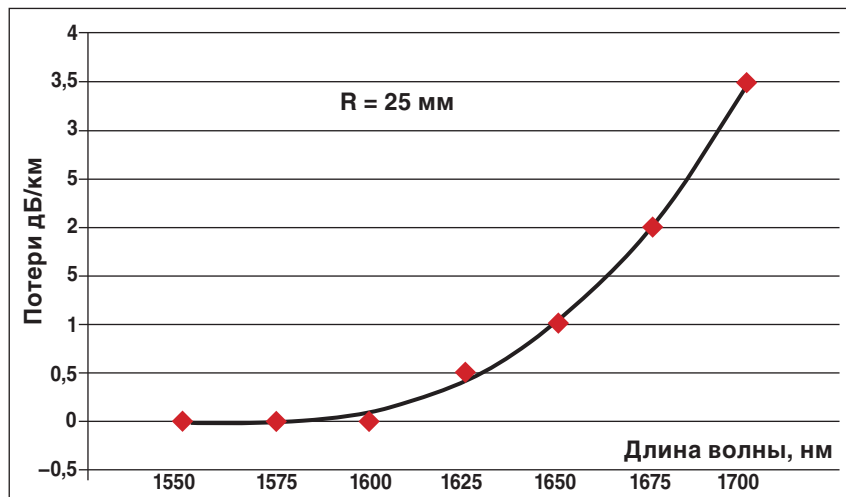


Рис. 3. Зависимость потерь на изгибе от длины волны

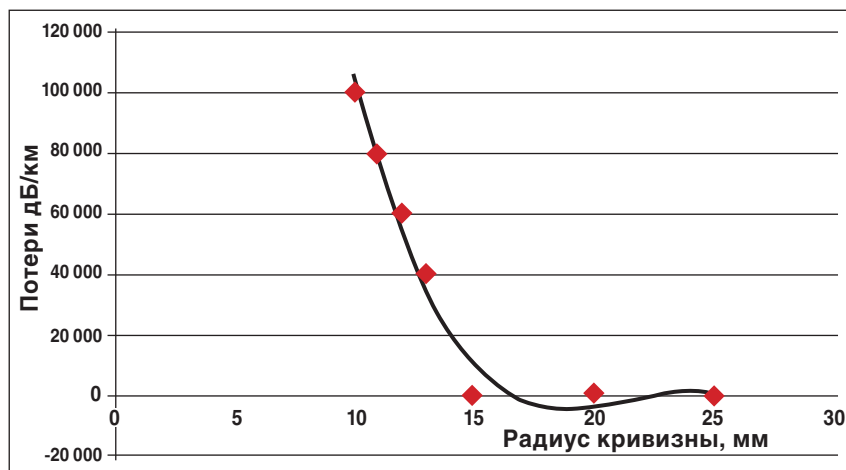


Рис. 4. Зависимость потерь от радиуса макроизгиба

$$n_r = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где n_0 – показатель преломления в центре волокна; r – расстояние от центра волокна до окружности, для которой определяется показатель преломления.

Для одномодовых волокон со ступенчатым профилем показателя преломления расчет потерь мощности при однократном изгибе можно выполнить по формуле (4):

$$\alpha = \frac{5\varphi L g l}{2\sqrt{\rho R}} D, \quad (4)$$

где φ – угол изгиба; R – радиус изгиба; ρ – радиус сердцевин; D – вероятность туннельного перехода через барьер.

Для многомодовых волокон при анализе потерь на макроизгибах

целесообразно использовать эмпирическую формулу:

$$\alpha = 10 \lg \left| 1 - \frac{2an_r^2}{R(NA)^2} \right|, \quad (5)$$

где NA – числовая апертура.

Анализ выражений для потерь на макроизгибах для одномодовых и многомодовых волокон и их чувствительности к радиусу кривизны макроизгиба говорит о том, что многомодовые волокна слабо чувствительны к малым изменениям радиуса кривизны макроизгиба, возникающим в результате изменений профиля трубопровода. Следовательно, для фиксации малого изменения затухания в многомодовом волокне потребуются повышенная чувствительность приемной части профиломера, что непременно скажется на его конечной стоимости. Волокно с

градиентным профилем показателя преломления тоже оказывается менее чувствительным к потерям на макроизгибах. Поэтому для дальнейшего анализа свойств оптических волокон и их компоновки на поверхности профиломера будет рассматриваться только одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления.

В работе [3] проведено теоретическое и экспериментальное исследование ослабления поля в одномодовых волокнах при однократном изгибе по малому радиусу ($R \approx 1 \div 10$ мм). Для построения теории потерь на изгибе авторы [3] используют аналогию туннельного прохождения частиц через потенциальный барьер. При этом разность коэффициентов преломления сердцевин и оболочки трактуется как высота барьера. При изгибе имеет место понижение этого барьера, и в результате увеличивается вероятность выхода излучения из сердцевин в оболочку.

По результатам этой модели было проведено аналитическое исследование потерь и на больших радиусах изгибов [5]. На рис. 3 приводится соответствующий график зависимости потерь.

Потери на фиксированном макроизгибе с радиусом кривизны 25 мм становятся больше при увеличении длины волны. Это объясняется зависимостью показателя преломления от длины волны. В свою очередь, зависимость потерь от радиуса кривизны макроизгиба при фиксированной длине волны представлена на рис. 4.

С уменьшением радиуса кривизны макроизгиба принимаемая мощность стремится к нулю. Это объясняется тем, что при малых радиусах изгиба возникает угол падения, превышающий критический угол падения для границы сердцевин и оболочки волокна, и большая часть излучения уходит в оболочку. В то же время необходимо отметить, что при фиксированной

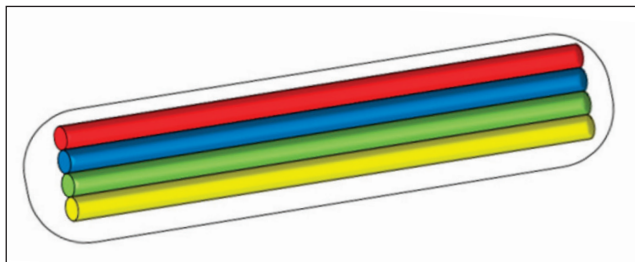


Рис. 5. Компоновка волокон в общую полосу

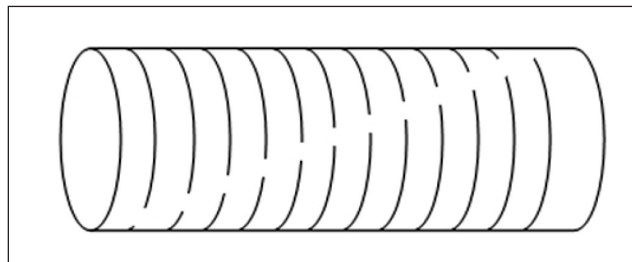


Рис. 6. Компоновка волокон на цилиндре

длине волны (1550 нм) потери становятся заметными лишь при радиусе кривизны меньше 15 мм. Согласно предыдущей зависимости (рис. 3) потери при радиусе кривизны в 25 мм становятся заметными при длине волны 1625 нм и выше. Следовательно, для фиксации широкого диапазона радиусов макроизгиба необходимо передавать по одному волокну сразу несколько длин волн, на приемной части выделяя потери на каждой из них, или использовать широкополосную систему передачи по одному волокну с приемом и обработкой широкополосного спектра, или передавать по каждому волокну индивидуальную длину волны, как и проводился изначальный эксперимент по фиксированию отклонений профиля трубы [2]. Этот вариант является наиболее оптимальным с точки зрения простоты реализации и стоимости. Но в этом случае необходимо

решить вопрос с точностью и локализацией отклонения профиля малого радиуса кривизны и размеров. Для этого предлагается использовать компоновку нескольких оптических волокон в общую широкую полосу (рис. 5).

В случае использования данной компоновки из четырех волокон общая ширина полосы составит примерно 1 мм, а для полного покрытия поверхности сферической формы, фиксирующей отклонения профиля в 5 мм для трубы диаметром 80 мм, потребуется нанести на поверхность около 40 полос с общей длиной волокна примерно 40 м.

Компоновка волокон для профиломера цилиндрической формы выполняется согласно рис. 6.

Для профиломера цилиндрической формы диаметром 80 мм, фиксирующего отклонения профиля в 5 мм, при данной компоновке потребуется 25 полос из

четырёх волокон с общей длиной волокна примерно 25 м. При этом длина профиломера может не превышать 3 см и ограничена габаритами приемно-передающей части, расположенной внутри профиломера.

Для приведенных выше компоновок волокон профиломера проводились теоретическое моделирование позиционирования и идентификация выявленных отклонений в профиле трубопровода, и это моделирование подтверждает целостность инновационной концепции внутритрубной диагностики трубопроводов малого диаметра. Реализация подобной профилометрии на практике приведет к уменьшению рисков возникновения аварий и инцидентов на производственных объектах предприятий нефтегазовой отрасли, так как повышается информативность диагностики и расширяется сфера диагностируемых объектов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Султанов А.Х., Виноградов С.Л., Виноградова И.Л. и др. Построение профиломера для трубопроводов диаметром 100–300 мм на основе волоконно-оптического сенсора // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 24–28.
2. Закиров Р.А., Салихов А.И., Виноградова И.Л. Разработка ПО для снятия внутреннего профиля трубопроводов // Сб. мат-лов XIV Междунар. науч.-практ. конф. «ОТТ-2016». Самара: ПГУТИ, 2016.
3. Аксенов В.А., Волошин В.В., Воробьев И.Л. и др. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 6. С. 734–742.
4. Дональд Дж. Стерлинг, мл. Техническое руководство по волоконной оптике. М.: Лори, 1998. 277 с.
5. Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Биличенко А.П. Исследование изгибных потерь волоконно-оптического кабеля // Сб. мат-лов XIX Всероссийской науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 2016.

REFERENCES

1. Sultanov A.Kh., Vinogradov S.L., Vinogradova I.L., et al. The construction of a caliper for pipelines with a diameter of 100–300 mm on the basis of fiber-optical sensor. *Izmeritel'naia tekhnika = Measuring equipment*, 2015, No. 10, P. 24–28. (In Russian)
2. Zakirov R.A., Salikhov A.I., Vinogradova I.L. Development of software for identification of internal profile of pipelines. *Materials of the XIV International scientific conference OTT-2016, 22–24 November, Samara, PSUTI, 2016*. (In Russian)
3. Aksenov V.A., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., et al. Losses in single-mode optical fibers occurring in isolated bends of small radius: rectangular profile of refractive index. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*, 2004, Vol. 49, No. 6, P. 734–742. (In Russian)
4. Donald J. Sterling, Jr. *Technician's guide to fiber optics*. 2nd ed., Dehner, Albany, NY, 1998.
5. Mekhtiev A.D., Neshina E.G., Bilichenko A.P. Study bending losses of fiber optic cable. *The materials of XIX All-Russian scientific-technical conference «Modern problems of radio electronics», May 5–6, Krasnoyarsk, Federal State Autonomous educational institution «Siberian Federal University», 2016*. (In Russian)