

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

# Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик натяжения (механических напряжений) в оптических волокнах на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния.

*Ключевые слова:* бриллюэновская рефлектометрия, ранняя диагностика, рефлектометр, оптоволокно.

## 1. Введение

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является получение достоверной информации о физическом состоянии оптического волокна (ОВ). Для оценки надежности ВОЛС необходимо иметь достоверную информации о натяжении ОВ в оптической кабеле (ОК).

Растягивающая сила, приложенная к ОВ, изменяет его параметры: коэффициент преломления и модуль Юнга, который в свою очередь влияет на изменение скорости гиперзвуковой волны [1–5].

Одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ является метод бриллюэновской рефлектометрии [1–3], в основе которого лежит регистрация и последующий анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в ОВ.

Известно [1], что спектральные компоненты, обусловленные бриллюэновским рассеянием (БР) света, обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота смещена на величину, пропорциональную степени натяжения волокна.

Зондируя ОВ короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение вдоль ОВ СБР. Анализируя картину распределения спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) в ОВ, можно обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и определить их характеристики.

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии определить натяжение ОВ. Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС (натяжения ОВ) применяются бриллюэновские оптические рефлектометры (БОР).

## 2. Сведения из теории

Распространение световых импульсов в ОВ сопряжено с одновременным воздействием нескольких нелинейных эффектов. Одним из эффектов, представляющих интерес для дальнейшего анализа, является БР, особенностью которого является его зависимость от таких па-

раметров ОБ, как механическое натяжение и температура. В работах [1–5] были рассмотрены вопросы построения математических моделей БР в ОБ и исследования влияния параметров натяжения ОБ на его спектр.

Основным выражением, связывающим частоту бриллюэновского частотного  $f_B$  сдвига и степень натяжения ОБ, является формула [3–5]:

$$f_B = \frac{2nv_a}{\lambda},$$

где  $n$  – коэффициент преломления,  $\lambda$  – длина волны падающего света,  $v_a$  – скорость акустической волны :

$$v_a = \sqrt{\frac{E_\varepsilon}{\rho}},$$

$E_\varepsilon$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность кварцевого стекла [3].

Величина бриллюэновского сдвига частоты, в свою очередь, входит в выражение для бриллюэновского коэффициента (БКУ) усиления [2–4]:

$$g_B = \frac{\hat{g}_B}{1 + \left(2 \frac{\Delta f - f_B}{\Delta f_B}\right)^2},$$

где  $\hat{g}_B$  – максимальный БКУ при  $\Delta f = f_B$ ;  $\Delta f$  – разность между частотой вводимого в ОБ света и частотой наблюдения;  $\Delta f_B$  – ширина полосы бриллюэновского усиления.

Примерное значение  $\hat{g}_B$  равно  $10^{-11}$  м/Вт, а  $\Delta f_B$  – 70 МГц [1, 5].

Для получения СБР, связывающего спектр зондирующего импульса  $S_P(f)$ , форму спектра бриллюэновского рассеяния  $S_B(f)$  и спектр источника излучения  $S_L(f)$  (символ  $\otimes$  обозначает операцию свёртки), используем выражение [5]:

$$S(f) = S_P(f) \otimes S_B(f) \otimes S_L(f).$$

На рис. 1 показан вид СБР, полученный в результате моделирования ОБ, находящегося под

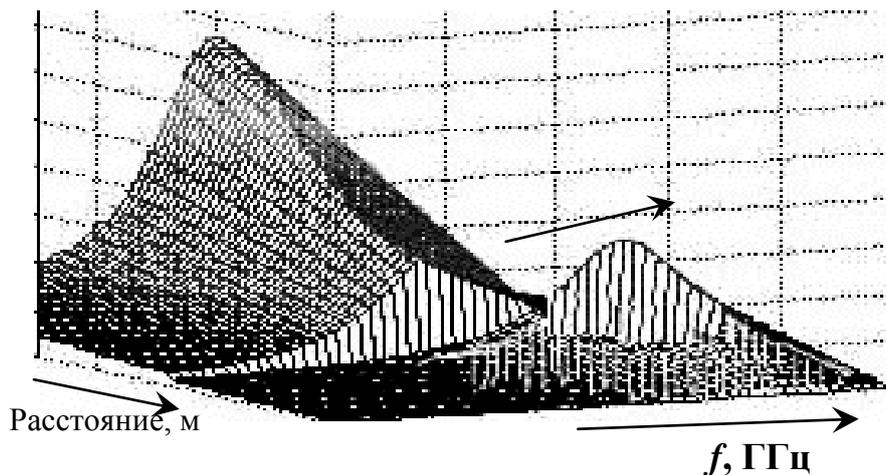


Рис. 1. Картина СБР, полученная при моделировании действием продольной растягивающей силы [3, 4]

На рис. 2 показана зависимость смещения максимума СБР от величины растягивающей нагрузки, полученная в результате моделирования [3, 4].

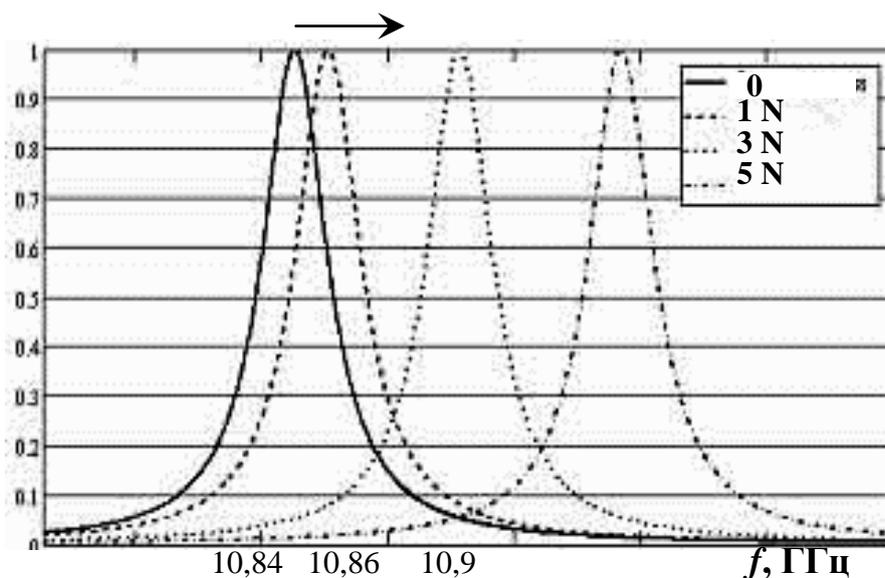


Рис. 2. Графики смещения СБР при различных растягивающих усилиях

### 3. Постановка задачи

С целью уточнения моделей, рассмотренных в [1–5], и проверки результатов имитационного моделирования [8] были проведены экспериментальные исследования с БОР «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

### 4. Результаты экспериментов

Для экспериментальных исследований световод был составлен из ОВ нормализующей катушки (1) (длина 1,73 км), сваренного с другим ОВ (3) (длина 3 км) (рис. 3). Место сварки на рис. 3 и рис. 4 обозначено стрелкой «2», максимум СБР – стрелкой «4».

Оба ОВ являются одномодовыми.

На расстоянии 2 м от места сварки на ОВ1 было сформировано место, на которое подвешивались гири массой от 20 г до 500 г.

Катушки были расположены так, чтобы растягивающая сила действовала на ОВ1 только в продольном направлении.

На рис. 3 представлена картина СБР в световоде (3D-рефлектограмма – функция распределения амплитуды отраженного сигнала по длине световода и бриллюэновского сдвига частоты) при отсутствии растягивающего усилия.

На рис. 4 представлена картина СБР при воздействии силы в 1 Н (гиря в 100 г).

Как видно из рис. 4, наблюдаются небольшие изменения СБР.

При увеличении нагрузки до 5 Н (500 г) изменения СБР проявляются в месте растяжения сильнее, что показано на рис. 5.

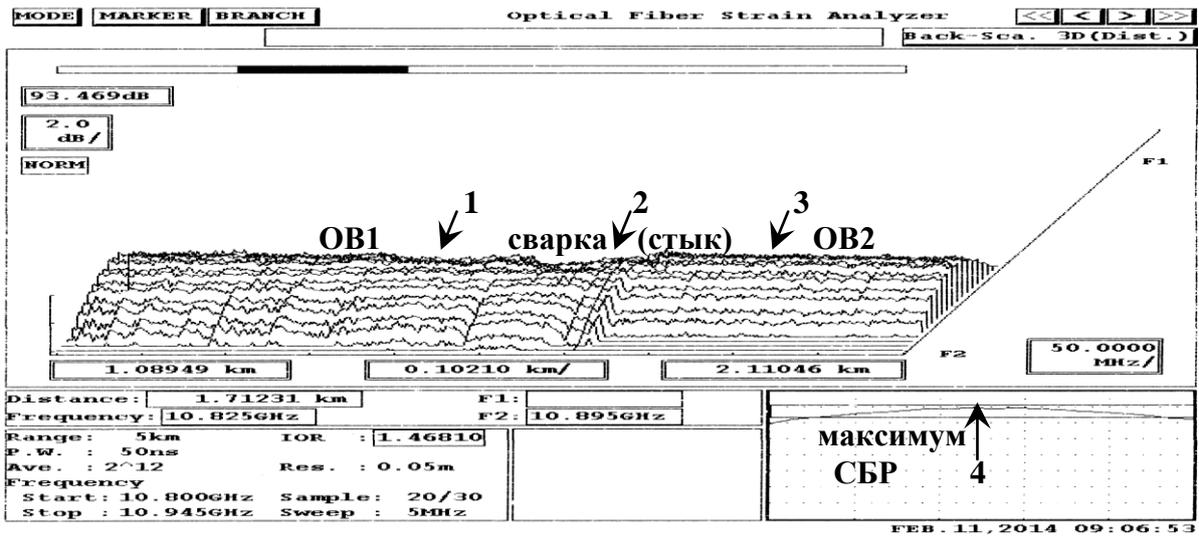


Рис 3. Картина СБР в световоде без продольной нагрузки

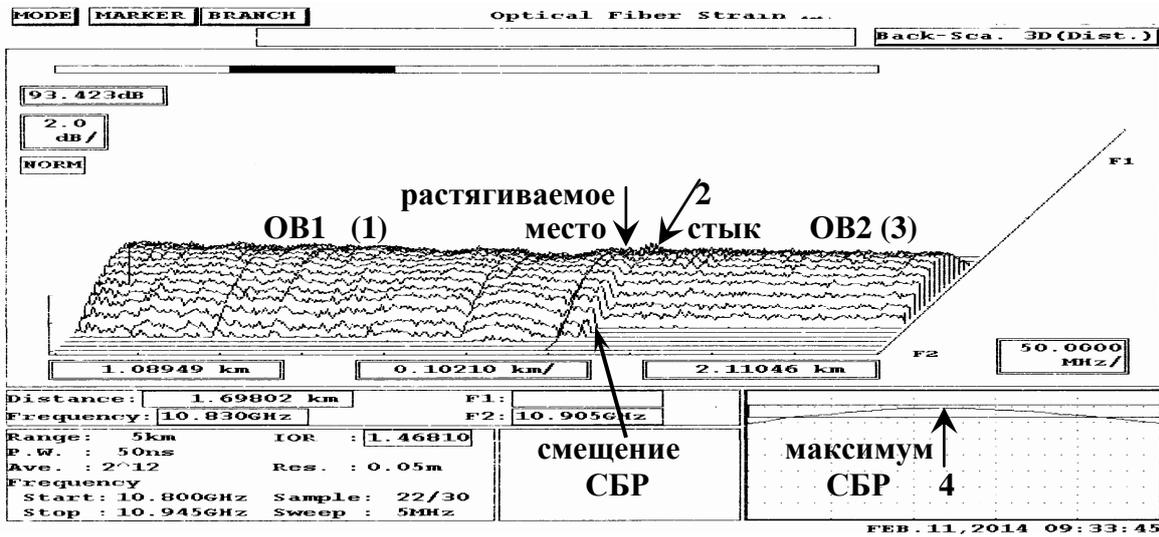


Рис 4. Картина СБР в световоде при продольной нагрузке 1 Н (100 г)



Рис 5. Картина СБР в световоде при продольной нагрузке 5 Н (500 г)

Следует отметить, что уже при нагрузке в 300 г наблюдается падение уровня отражённого сигнала за растягиваемым местом, что связано с появлением продольных нагрузок в месте крепления гирь из-за асимметрии воздействия в месте крепления [8].

Анализ СБР [1–5] при известном показателе преломления сердечника позволяет определить натяжение на различных участках световода.

На рис. 6 – 8 представлены соответствующие зависимости по длине световода натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss).

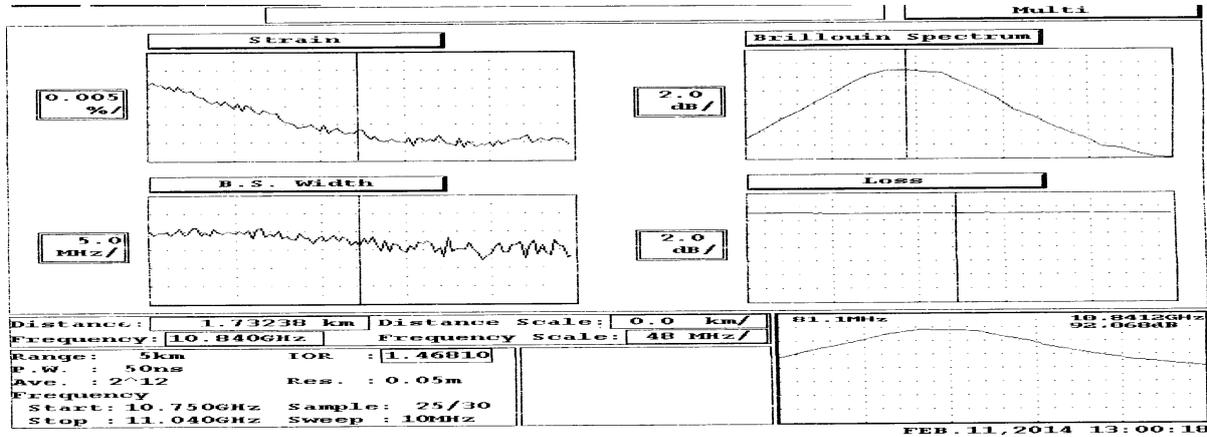


Рис. 6. Итоговая мульти-рефлектограмма без продольной нагрузки

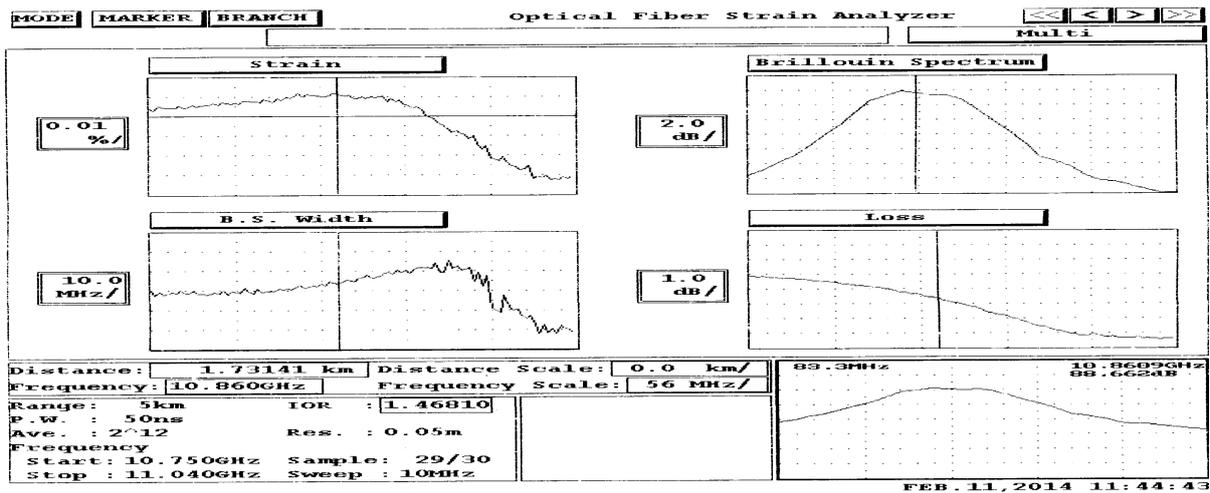


Рис. 7. Итоговая мульти-рефлектограмма в ОВ при продольной нагрузке в 1 Н (100 г)

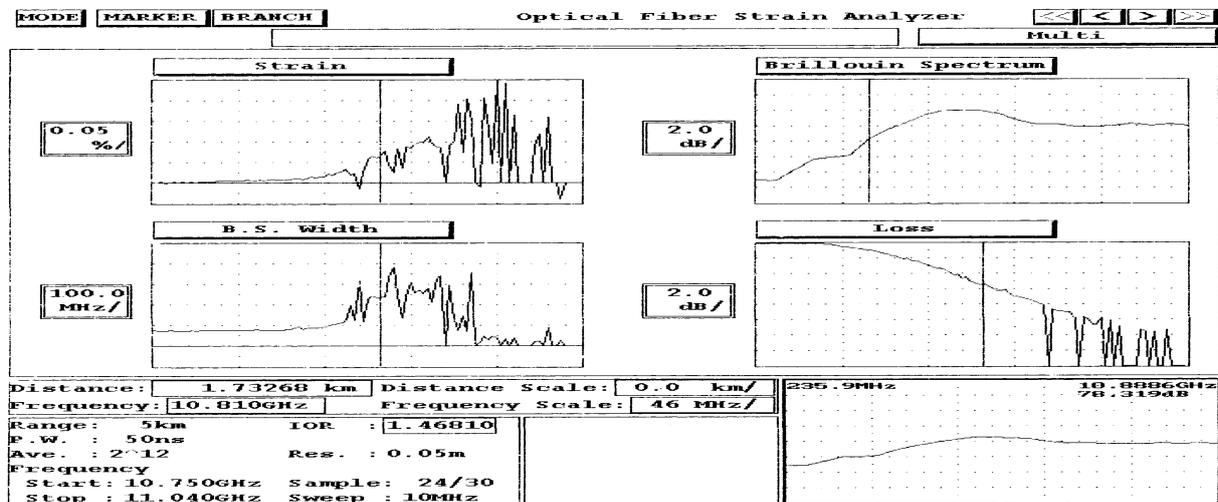


Рис. 8. Итоговая мульти-рефлектограмма в ОВ при продольной нагрузке в 5 Н (500 г)

Анализ СБР [1–5] при известном показателе преломления сердечника позволяет определить натяжение на различных участках световода.

При изменении величины продольной растягивающей силы наблюдалось смещение максимума СБР от 10.84 ГГц (без нагрузки) до 10.90 ГГц (5 Н), что соответствует изменению натяжения ОВ в области, находящейся под нагрузкой.

На рис. 9 – 11 представлены соответствующие графики степени натяжения (Strain) по длине световода.

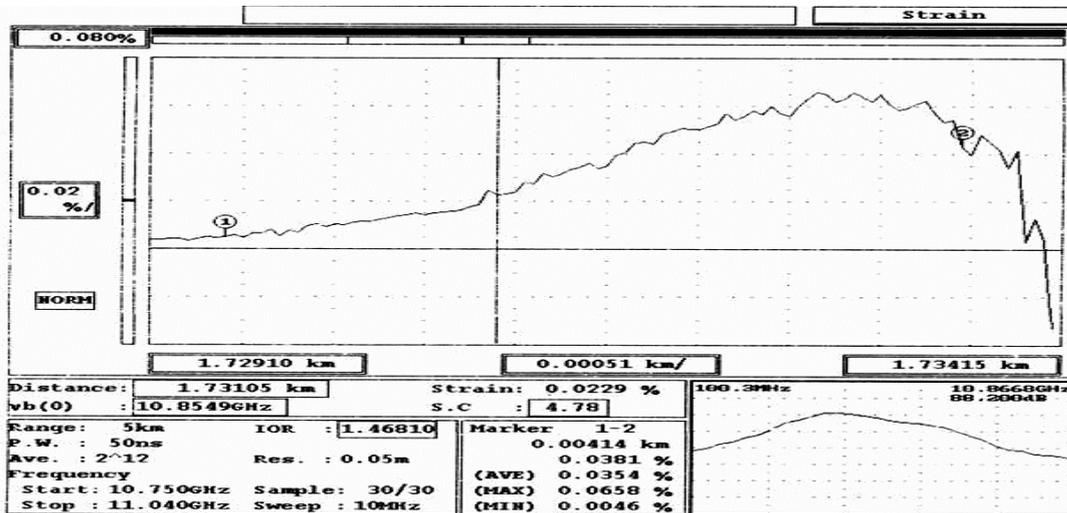


Рис. 9. График изменения натяжения по длине световода при растягивающей силе 2 Н (максимальное натяжение – 0.065 %)

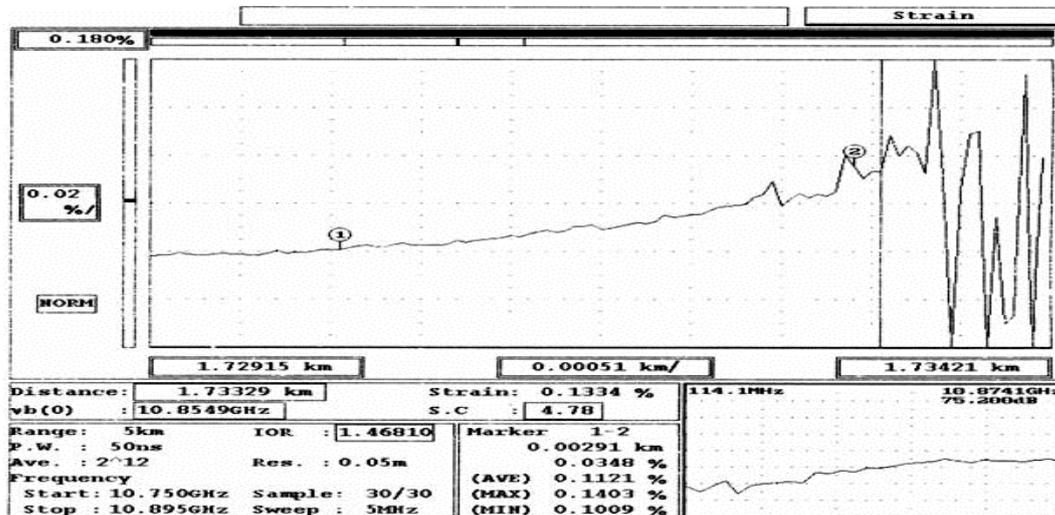


Рис. 10. График изменения натяжения по длине световода при растягивающей силе 3 Н (максимальное натяжение – 0.14 %)

Из рисунков видно, что БОР обнаружил изменение натяжения на «проблемном участке». Натяжение изменилось примерно на 0.05 % при растягивающей силе в 2 Н и на 0.12 % при растягивающей силе в 4 Н.

При дальнейшем увеличении нагрузки до 5 Н было обнаружено достижение критического значения натяжения 0.2 % [8].

После снятия нагрузки натяжение ОВ возвращалось в исходное состояние.

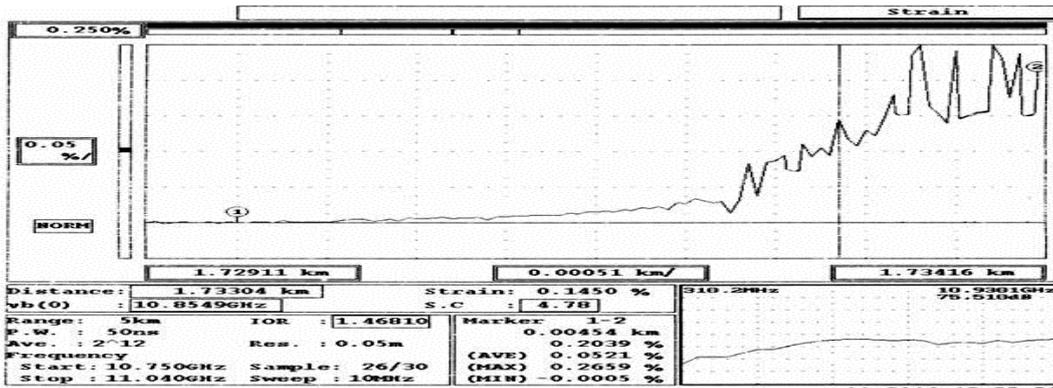


Рис. 11. График изменения натяжения по длине световода при растягивающей силе 5 Н (максимальное натяжение – 0.26 %)

Таким образом, анализ СБР позволяет эффективно обнаруживать изменение натяжения (модуля Юнга  $E_s$ ) ОВ.

Полученные результаты имеют качественное сходство с результатами, приведенными в [9, 10].

На рис. 12 представлены зависимости максимума СБР в зависимости от натяжения (модуля Юнга) при различных температурах ОВ [10], полученные другими способами.

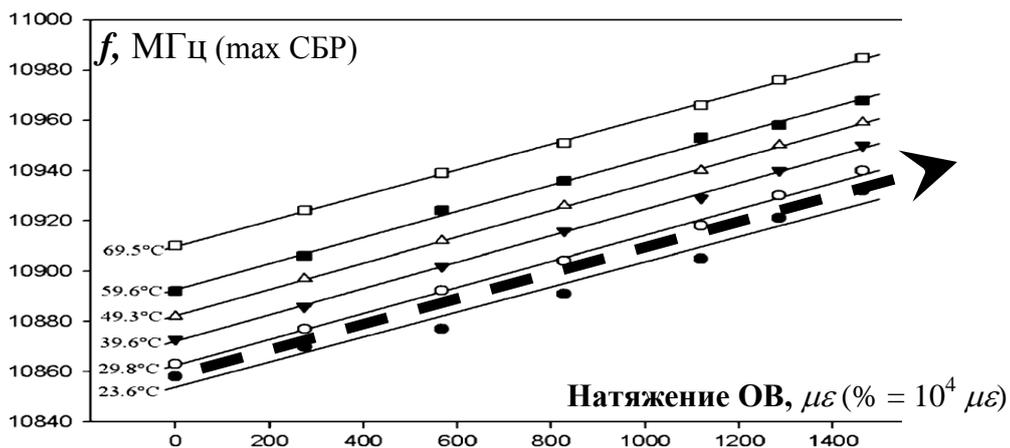


Рис. 12. График изменения максимума СБР в зависимости от натяжения (модуля Юнга) при различных температурах ОВ

Данные эксперимента, описанного в нашей статье, на графике показаны штриховой линией со стрелкой. Очевидно, что графики имеют хорошее совпадение.

## 5. Заключение

Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения механически напряженных участков и оценки степени натяжения ОВ на основании анализа СБР при различных растягивающих нагрузках.

## Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Методы и средства мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 192 с.

2. *Богачков И. В., Овчинников С. В., Горлов Н. И., Ситнов Н. Ю.* Применение численных методов анализа бриллюэновского рассеяния для оценки распределенных нерегулярностей в волоконно-оптических линиях связи // Телекоммуникации №2, 2014. – М.: Наука и технологии, 2014 – С. 16 – 20.
3. *Bogachkov I. V., Ovchinnikov S. V., Maistrenko V. A.* Applying of Brillouin Scattering Spectrum Analysis for Detection of Distributed Irregularities in Optic Fibers and Estimation of Irregularities Parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University.
4. *Богачков И. В., Овчинников С. В., Майстренко В. А.* Применение анализа бриллюэновского рассеяния для обнаружения распределенных нерегулярностей в оптических волокнах и оценки их характеристик // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University.
5. *Богачков И. В., Овчинников С. В., Горлов Н. И.* Повышение точности оценки распределенных нерегулярностей в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – Вып. 4 (20). – С. 3 – 13.
6. *Bogachkov I. V., Gorlov N. I.* Experimental Examination of the Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings.– V. 1, pp. 223 – 227.
7. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Экспериментальные исследования характеристик натяжения оптических волокон // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП, Т. 3. Новосибирск, 2014.– С. 119 – 123.
8. *Ситнов Н. Ю., Горлов Н. И., Богачков И. В.* Экспериментальная проверка метода рефлектометрии в частотной области с широкополосным зондирующим сигналом // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – Вып. 3 (19). – С. 59 – 80.
9. *Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А.* Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. – 2006. – №1. – С. 23 – 25.
10. *Belal M., Newson T. P.* Experimental Examination of the Variation of the Spontaneous Brillouin Power and Frequency Coefficients Under the Combined Influence of Temperature and Strain // Journal of Lightwave Technology, 2012, vol. 30, no. 8, pp. 1250 – 1255.

*Статья поступила в редакцию 29.04.2015;  
переработанный вариант – 24.06.2015*

### **Богачков Игорь Викторович**

к.т.н., доцент; доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, член IEEE,  
e-mail: bogachkov@mail.ru.

### **Горлов Николай Ильич**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Линии связи» Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики (СибГУТИ), действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

### **Experimental Examination of the influence of longitudinal stretching forces on the Brillouin backscattering spectrum in optical fibers**

**I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov**

In this paper, the results of experimental examination of the strain characteristics (mechanical stresses) of optical fibers based on Brillouin backscattering spectrum analysis are presented.

*Keywords:* Brillouin reflectometry, early diagnostics, reflectometer, optical fiber.