

[5] Камбаров М.Н. и др. Способ повышения подъемной силы лопастей. Инновационный патент Казахстана № 278655, 2016 г.

[6] Камбаров М.Н., Садыкбек Т.А. Способ снижения турбулентности на лопастях (крыльях) естественных потоков энергии. Заявка на изобретение № 1251 /2021.01

[7] М.Н. Камбаров. Повышение мощности и эффективности крупных ветротурбин. Материалы Всемирного Конгресса ученых и инженеров, Том 2. Энергия будущего: инновационного сценарии и методы их реализации WSEC -2017. стр.190-196.

УДК 004.9

В. Вуйцик^{1,2}, П. Кисала^{1,2}, А.У. Калижанова^{1,3,с}, А.Х. Козбакова^{1,4,d}, Ж.С.Айткулов^{1,5}

¹Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК, Казахстан

²Люблинский технический университет, Польша

³Алматинский университет энергетики и связи, Казахстан

⁴Алматинский технологический университет, Казахстан

⁵Академия логистики и транспорта, Казахстан

^с kalizhanova_aliya@mail.ru, ^d ainur79@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТУРА

Аннотация. В работе предложен метод определения спектральной длины контура для демодуляции спектра наклонной волоконной решетки Брэгга. В этом методе используется расчет длины волны отсечки для определения показателя преломления жидкости, окружающей оптическое волокно. Длина контура может использоваться как параметр, указывающий значение измеренного показателя преломления. Алгоритм состоит в определении кривой изменения длины контура вместе с длиной волны для каждого спектра, измеренного с заданным показателем преломления. Длина волны отсечки определяется как пересечение отдельных кривых с линией, определяющей определенный уровень. Проведен анализ и исследование методов определения показателя преломления на основе спектров пропускания НВРБ.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, наклонные волоконные решетки Брэгга, рефрактометр, показатель преломления.

Андатпа. Жұмыста көлбеу талшықты Брэгг торының спектрін демодуляциялау үшін контурдың спектрлік ұзындығын анықтау әдісі ұсынылған. Бұл әдісте оптикалық талшықты қоршап тұрған сұйықтықтың сыну көрсеткішін анықтау үшін қима толқынының ұзындығын есептеу қолданылады. Контурдың ұзындығы өлшенілген сыну көрсеткішінің мәнін көрсететін параметр ретінде пайдалануға болады. Алгоритм берілген сыну көрсеткішімен өлшенген әр спектр үшін толқын ұзындығымен қатар контурдың ұзындығының өзгеру қисығын анықтаудан тұрады. Қима толқынының ұзындығы жеке қисықтардың белгілі бір деңгейді анықтайтын сызықпен қиылысуы ретінде анықталады. БКТТ-ның өткізу спектрлері негізінде сыну көрсеткішін анықтау әдістеріне талдау және зерттеу жүргізілді.

Кілттік сөздер: оптикалық-талшықты датчиктер, брэггтің көлбеу талшықты торлары, рефрактометр, сыну көрсеткіші.

Abstract. The paper proposes a method for determining the spectral length of the contour for demodulating the spectrum of a tilted fiber Bragg grating. This method uses cutoff wavelength calculations to determine the refractive index of the liquid surrounding the optical fiber. The contour length can be used as a parameter indicating the value of the measured refractive index. The algorithm consists in determining the curve of the change in the length of the contour together with the wavelength for each spectrum, measured with a given refractive

index. Cutoff wavelength is defined as the intersection of individual curves with a line that defines a specific level. This method is very simple, but at the same time it has a very high sensitivity. The analysis and study of methods for determining the refractive index based on the transmission spectra of NWRB are carried out.

Key words: Fiber optic sensors, tilted fiber Bragg gratings, refractometer, refractive index.

Введение

Наклонные волоконные решетки Брэгга (НВРБ) часто используются для измерения показателя преломления (ПП). Такие измерения заключаются в контроле изменения пропускания спектра решетки в диапазоне мод оболочки. Оптические волокна в качестве преобразователей часто используются и постоянно развиваются в различных областях применения датчиков [1]. Это связано с их очевидными преимуществами, такими как малый вес и размер, устойчивость к окружающей среде или возможность дистанционного зондирования.

В типичном цилиндрическом оптическом волокне свет распространяется плавно, и внешние факторы на него не влияют. Чтобы оптическое волокно было чувствительным к определенным физическим величинам, оно должно быть соответствующим образом искажено. Одним из таких методов является запись в оптическом волокне периодической структуры и создание решетки Брэгга. Известно, что эта структура чувствительна к температуре и растяжению. Если изменения периодического возмущения показателя преломления сердцевинки (ПП) наклонены под определенным углом θ относительно перпендикуляра к диаметру сердцевинки, активируются так называемые моды оболочки, распространяющиеся назад по направлению света в ядро. Моды оболочки распространяются в оболочке и на границе оболочки и окружающей среде оптического волокна. Взаимодействие мод оболочки с изменениями показателя преломления окружающей среды (SRI - surrounding refractive index of the medium) влияет на спектр пропускания решетки. Это один из механизмов, благодаря которому оптическое волокно становится датчиком. Наиболее важным преимуществом такого решения является отсутствие необходимости разрушать структуру оптического волокна, удаляя его оболочку.

В НВРБ свет связан не только со встречной модой сердцевинки, но и со встречной модой оболочки. В зависимости от изменения угла наклона показателя преломления сердечника в спектре пропускания решетки появляются узкие пики, каждый из которых соответствует одной моде оболочки. Основная длина волны Брэгга зависит от эффективного показателя преломления сердечника n_{core} и периода решетки Λ сердцевинки возмущения ПП:

$$\lambda_{ВРБ} = 2 \cdot n_{core} \cdot \Lambda \quad (1)$$

Для решетки НВРБ пики отдельных мод оболочки находятся в более коротком диапазоне длин волн, чем основной пик Брэгга:

$$\lambda_{НВРБ(m)} = (n_{core} - n_{clad(m)}) \cdot \frac{\Lambda}{\cos(\theta)} \quad (2)$$

где $n_{clad(m)}$ - эффективный показатель преломления m -й моды оболочки. В типичной НВРБ имеется несколько десятков мод оболочек, и они создают в спектре характерную плотную спектральную гребенку узкополосных резонансов. В спектре решетки с большим углом наклона моды оболочки появляются дальше от основного пика Брэгга (для более коротких волн). В результате можно измерять показатель преломления с меньшими

значениями. Большой угол наклона также уменьшает интенсивность основной моды Брэгга. Для расширения диапазона измерения SRI можно использовать решетку, состоящую из нескольких решеток с различным углом наклона [2]. Типичная система рефрактометра НВРБ схематически показана на рисунке 1. Распространяющийся свет в сердечнике частично отражается к сердечнику и частично к оболочке. Между оболочкой и окружающей средой создается новая структура, из которой, в зависимости от SRI, некоторые моды выполняются, а некоторые - утекают. Мода, которая находится на границе между управляемой и утекающей, называется модой отсечки.

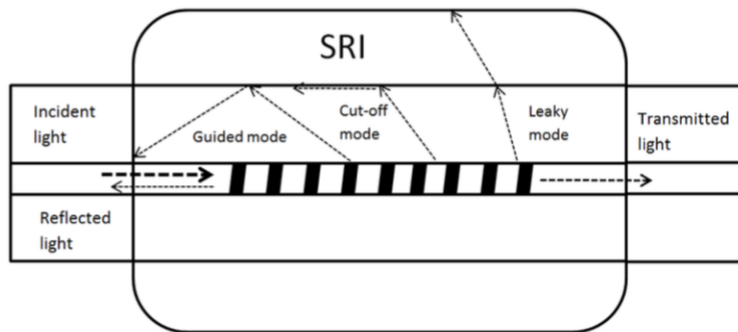


Рисунок 1 – Принципиальная схема рефрактометра НВРБ

В настоящее время наклонные волоконные решетки Брэгга являются объектом многих исследований. Возможности новых датчиков также появляются в связи с другими технологиями производства, такими как прямая запись с использованием фемтосекундного лазера [3]. В дополнение к измерениям показателя преломления окружающей среды SRI наклонные волоконные решетки Брэгга можно использовать в качестве датчиков изгиба [4] и скручивания [5,6].

Методы исследования. Алгоритм длины спектрального контура.

Существует много методов демодуляции спектра НВРБ. Их можно разделить следующим образом:

- методы, использующие спектр всех мод оболочек (глобальные методы),
- методы, использующие сдвиг длины волны одиночной моды оболочки [7].

Методы, использующие сдвиг длины волны одиночной моды оболочки, должны основываться на модах, близких к порогу отсечки, поскольку тогда они являются наиболее чувствительными. Недостатком этого решения является ограниченная область измерения с использованием одной моды и очень нелинейная зависимость сдвига от изменений SRI [8]. В случае более широкого диапазона измерений следует выбирать и использовать сдвиг нескольких мод, различающихся в определенных поддиапазонах. Было также предложено расширить этот метод с помощью вейвлет-преобразования. Преобразование обеспечивает уменьшение шума в спектре и определение сдвига пиковых длин волн мод на основе сдвига отфильтрованного спектра (вейвлет-коэффициентов) [9].

Первый тип методов (глобальные методы) может быть разделен следующим образом:

- методы, использующие амплитуду мод оболочки для расчета таких параметров, как площадь, занятая модами оболочки [10], статистические параметры (асимметрия и эксцесс) [11] или стандартное отклонение спектра моды оболочки от его среднего значения¹²,

- методы определения длины волны отсечки, когда отдельные моды оболочки перестают переноситься и начинают вытекать из оболочки [13,14].

Несомненно, наиболее популярным методом является метод площадей, который в дополнение к определению SRI также можно использовать с НВРБ для определения

уровня жидкости [15]. Длина волны отсечки - это длина волны моды, которая имеет эффективный показатель преломления, точно равный окружающей жидкости. Управляемые моды имеют эффективный показатель преломления, превышающий SRI, так что полное внутреннее отражение может происходить на границе оболочки и окружающей среды. Моды утечки имеют эффективный показатель преломления ниже, чем SRI. Оставление большего количества мод оболочки вне волокна означает, что мощность, передаваемая решеткой, уменьшается, что также может использоваться для определения SRI [16].

Проблема с определением длины волны отсечки заключается в дискретном характере мод и спектральном расстоянии между ними. Для этой цели может быть использован алгоритм, основанный на определении нижней и верхней огибающей спектра моды оболочки, а затем на основе этих кривых [17]. Недавно был предложен способ определения отсечки длины волны посредством определения конкретного значения уровня спектра передачи [18]. В качестве эталонного спектра используется спектр для большого значения SRI, в котором невозможно распознать отдельные моды оболочки, поскольку они сглаживаются, в результате чего простой спектр решетки в этом диапазоне является непрерывным и гладким.

В базовой версии метод контуров включает вычисление длины спектрального контура для спектра в конкретном спектральном диапазоне [19]. Этот спектр представляет собой спектр разности между измеренным спектром и спектром моделирования. Когда длина контура достигает минимума, это означает, что анализируемый компонент был вычтен из измеренного спектра. Это решение упрощает процесс калибровки, поскольку нет необходимости использовать спектры калибровочных смесей и только спектры одного выбранного компонента. Наиболее важным из его преимуществ является устойчивость к колебаниям базовой линии. Это особенно важно в случае измерений на "открытом пути", когда точное знание фоновых спектров невозможно. Однако алгоритм не может справиться с помехами в спектре, которые не являются непрерывными. В случае газового анализа также важно разрешение измерений. Лучше всего, если будет достаточно различить отдельные линии вращения, потому что тогда изменения в длине контура вместе с изменениями в содержании газа будут больше. Более низкое разрешение вызывает сглаживание линий вращения и в конечном итоге их исчезновение. При небольшом разрешении алгоритм определения концентрации может дать значительные ошибки, особенно при измерении небольшого содержимого. Длина контура может быть рассчитана по следующей формуле:

$$L = \sum_{i=0}^{N-1} |T_{i+1} - T_i| \quad (3)$$

Длина контура является показателем того, что точка, в которой можно определить содержание компонента, достигнута. Аналогичный алгоритм был описан как однолучевое титрование [20]. Однако вместо длины контура в качестве индикатора используется квадратное значение для каждой точки дифференциального синтетического спектра. Демодуляция НВРБ с использованием этого метода включает в себя вычисление длины контура для нескольких измеренных калибровочных растворов с известным SRI и затем определение отношения:

$$L = f(\text{SRI}) \quad (4)$$

Затем при измерении жидкостей с неизвестным показателем преломления калибровочная кривая из уравнения 4 используется для определения искомого SRI [21]. Этот метод относится к группе методов, которые могут быть определены как глобальные.

Они используют изменения в пропускании спектра для диапазона мод оболочки. Этот метод, однако, намного проще, чем конверт из наиболее популярных режимов вычислительной оболочки. Не требует поиска спектров минимумов и максимумов. Кроме того, используются все спектральные точки, что снижает влияние шума измерений на точность анализа. Модификация метода длины контура для определения длины волны отсечки будет представлена на примере анализа экспериментальных данных в следующем абзаце.

Определение длины волны отсечки на основе модифицированного алгоритма длины контура.

Во время измерений НВРБ погружали в раствор воды с тростниковым сахаром. Используемая решетка имела угол наклона $\theta = 7^\circ$ и была сохранена с использованием метода фазовой маски. Измерения спектра проводились при разрешении 0,02 нм. Решетку постарались сохранить, чтобы не вызвать дополнительных изгибов и кривых. На рисунке 2 показан спектр пропускания для решетки, помещенной в воздухе (SRI = 1). Поскольку спектр решетки отличается для каждого из ее образцов, процесс калибровки при этом определяет длину волны отсечки и должен выбираться индивидуально. На спектр решетки в основном влияют угол наклона, длина решетки, глубина модуляции показателя преломления и ее распределение по длине решетки (аподизация). На рисунке 3 показаны моды оболочки наклонной решетки для различных значений SRI. Спектры были сдвинуты на фиксированные значения, чтобы показать их характерные особенности. Как можно видеть, моды оболочки исчезают со стороны более коротких волн при увеличении SRI. Рисунок 4 (слева) показывает взаимосвязь между нормализованной длиной контура и SRI. На рисунке 4 (справа) представлены изменения нормированной длины контура в зависимости от длины волны для нескольких коэффициентов SRI.

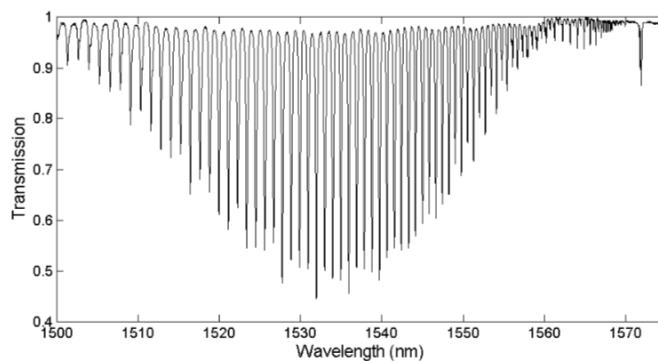


Рисунок 2 – Спектр тестируемого НВРБ, помещенного в воздухе

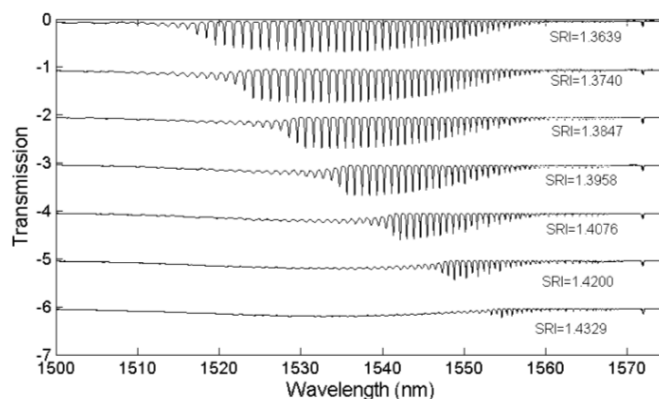


Рисунок 3 – Спектры тестируемого НВРБ помещены в растворы воды с сахаром для нескольких значений SRI

Алгоритму расчета калибровочной кривой должен предшествовать выбор диапазона анализируемых длин волн. В рассматриваемом случае использовался диапазон от 1500 до 1575 нм. Определение точки на калибровочной кривой (рис. 5) зависимости отсечки длины волны от показателя преломления для каждого измеренного спектра можно представить следующим образом:

- определение зависимости длины контура для отдельных длин волн:

$$L(j) = \sum_{i=0}^j |T_{i+1} - T_i| \quad (5)$$

где $j = 1, N-1$ и $L(j)$ - кумулятивная сумма первой разности спектра пропускания,

- аппроксимация кривой от предыдущей точки полиномом заданной степени,

$$L_a(j) = L(j) \quad (6)$$

- определение пересечения аппроксимируемой кривой с горизонтальной линией, определяющей пороговый уровень, т.е. определение длины волны отсечки (COW- cut-off wavelength),

$$L_a(j_{tl}) = tl \quad (7)$$

- аппроксимация длины волны отсечки (COW) и кривой SRI (SRI):

$$COW = g(SRI) \quad (8)$$

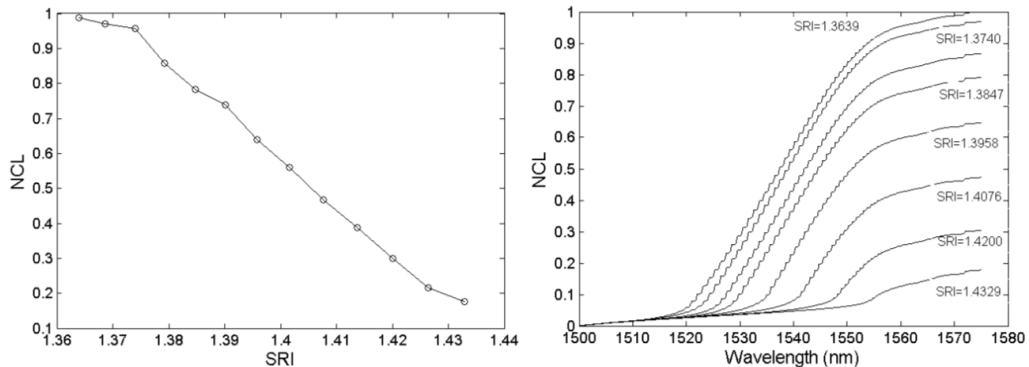


Рисунок 4 – Изменение нормализованной длины контура с изменением SRI (слева), изменение нормализованной длины контура с длиной волны для отдельного SRI (справа)

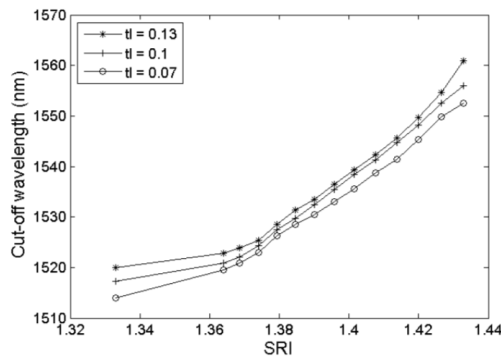


Рисунок 5 – Граничная зависимость длины волны от внешнего показателя преломления для трех уровней

Как видно на рисунке 5, положение кривой, представляющей зависимость длины волны отсечки от SRI, зависит от точки пересечения кривой длины контура и выбранного

уровня tl (порогового уровня). Этот уровень нужно подбирать индивидуально для каждого вида решеток.

Заключение

В работе предложена разработка метода определения длины спектрального контура для демодуляции спектра НВРБ. Этот метод косвенно использует расчет длины волны отсечки для определения показателя преломления жидкости, окружающей оптическое волокно. Это характерная точка на оси длин волн, для которой моды оболочки перестают распространяться в оболочке и становятся модами утечки. Метод контура заключается в вычислении его длины для спектра, начиная со стороны более коротких волн. Кривая, образующая длину контура, представляет собой восходящую кривую. В то же время при меньших значениях SRI его увеличение начинается раньше. Следовательно, при поиске определенного уровня длины контура для каждого SRI получаем другое значение длины волны, перемещающееся вдоль оси длин волн. Увеличение SRI приводит к смещению длины волны в сторону более длинных волн. Значение длины контура увеличивается неравномерно с длиной волны. Большие значения увеличения длины происходят в тех местах спектра, где видна мода, что делает кривую ступенчатой. Если мода пропадает, то длина контура соответственно уменьшается. Чтобы исключить пропуск определяемой длины отсечки от одного к другому, в качестве промежуточного шага предлагается аппроксимация кривой контурной длины полиномами, что приводит к сглаживанию и исчезновению ступенек. Для проанализированных измерений средняя чувствительность в диапазоне 1,36–1,43 составляет около 520 нм / RIU.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Оптоэлектроники факультета электротехники и компьютерных наук Люблинского технического университета в рамках проекта ГФ №AP09259547 «Разработка системы из распределенных волоконно-оптических датчиков на основе волоконных решеток Брэгга для контроля состояния строительных конструкций» ИИВТ КН МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yin, M., Gu, B., An, Q., Yang, C., Guan, Y., Yong K. "Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications," *Coordination Chemistry Reviews* 376, 348-392 (2018).
- [2] Chen, X., Xu, J., Zhang, X., Guo, T., Guan, B. O., "Wide range refractive index measurement using a multi-angle tilted fiber Bragg grating," *IEEE Photonics Technology Letters* 29(9), 719-722 (2017).
- [3] Ioannou, A., Theodosiou, A., Caucheteur, C., Kalli, K., "Direct writing of plane-by-plane tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser," *Optics letters* 42(24), 5198-5201 (2017).
- [4] Kisała, P., Harasim, D., Mroczka, J., "Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber Bragg grating," *Optics express* 24(26), 29922-29929 (2016).
- [5] Ciężczyk, S., Harasim, D., Kisała P., "Novel twist measurement method based on TFBG and fully optical ratiometric interrogation." *Sensors and Actuators A: Physical* 272, 8-22 (2018).
- [6] Harasim, D., "The Influence of Fibre Bending on Polarization-Dependent Twist Sensor Based on Tilted Bragg Grating," *Metrology and Measurement Systems* 24(3), 577-584 (2017).
- [7] Chan, C. F., Chen, C., Jafari, A., Laronche, A., Thomson, D. J., Albert, J., "Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts," *Applied optics* 46(7), 1142-1149 (2007).
- [8] Zhao, C. L., Yang, X., Demokan, M. S., Jin, W., "Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3 slanted multimode fiber Bragg grating," *Journal of lightwave technology* 24(2), 879-883 (2006).

[9] Wong, A. C., Giovinazzo, M., Tam, H. Y., Lu, C., Peng, G. D., "Simultaneous two-parameter sensing using a single tilted Moiré fiber Bragg grating with discrete wavelet transform technique," IEEE Photonics Technology Letters 22(21), 1574-1576 (2010).

[10] Laffont, G., Ferdinand, P., "Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry," Measurement Science and Technology 12(7), 765-770 (2001).

[11] Caucheteur, C., Mégret, P., "Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer," IEEE Photonics Technology Letters 17(12), 2703-2705 (2005).

[12] Melo, L. B., Rodrigues, J. M. M., Farinha, A. S. F., Marques, C. A., Bilro, L., Alberto, N., Nogueira, R. N., "Concentration sensor based on a tilted fiber Bragg grating for anions monitoring," Optical Fiber Technology 20(4), 422-427 (2014).

[13] Liu, Z., Shen, C., Xiao, Y., Gong, J., Wang, J., Lang, T., Zhao, C., Huang, C., Jin, Y., Dong, X., Zhang, Y., Jing, Z., Peng, W., Semenova, Y., "Liquid surface tension and refractive index sensor based on a tilted fiber Bragg grating," J. Opt. Soc. Am. B 35, 1282-1287 (2018).

[14] Zhou, W., Mandia, D. J., Barry, S. T., Albert, J., "Absolute near-infrared refractometry with a calibrated tilted fiber Bragg grating," Optics letters 40(8), 1713-1716 (2015).

[15] Osuch, T., Jurek, T., Markowski, K., Jedrzejewski, K., "Simultaneous measurement of liquid level and temperature using tilted fiber Bragg grating," IEEE Sensors Journal 16(5), 1205-1209 (2016).

[16] Miao, Y., Liu, B., "Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating," Optical Fiber Technology 15(3), 233-236 (2009).

[17] Lu, Y. C., Geng, R., Wang, C., Zhang, F., Liu, C., Ning, T., Jian, S., "Polarization effects in tilted fiber Bragg grating refractometers," Journal of Lightwave Technology 28(11), 1677-1684 (2010).

[18] Pham, X., Si, J., Chen, T., Wang, R., Yan, L., Cao, H., & Hou, X., "Demodulation method for tilted fiber Bragg grating refractometer with high sensitivity," Journal of Applied Physics 123(17), 174501 (2018).

[19] J. Bak, "Retrieving CO concentrations from FT-IR spectra with nonmodeled interferences and fluctuating baselines using PCR model parameters," Applied Spectroscopy 55 (5), 591-597 (2001).

[20] Sung, L. Y., Lu, C. J., "A single-beam titration method for the quantification of open-path Fourier transform infrared spectroscopy," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 145, 43-49 (2014).

[21] Ciężczyk, S., Harasim, D., Kisała, P., "A novel simple TFBG spectrum demodulation method for RI quantification," IEEE Photonics Technology Letters 29 (24), 2264-2267 (2017).

УДК 621.316

Б.Т. Бахтияр^{1а}, А.Ж. Амренова^{2б}, Г.У. Турсунбаева^{1с}

¹Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан,

²Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева г. Алматы, Казахстан,

^аBahtyar.Baljan@mail.ru, ^бa.amrenova@aes.kz, ^сg.tursunbayeva@gmail.com

ҚАЗАНДЫҚТЫҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІ

Аңдатпа. Берілген мақалада қазандықтың энергия тиімділігін арттырудың бірнеше әдісі келтірілген және де ол әдістерді қолданғандағы қазандықтың энергия тиімділігі