

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП

А.И. БАЛАНДИН, *асп. каф. ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, вед. инженер филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,

М.И. КОПТЕНКОВ, *асп. каф. системы автоматического управления МГУЛ, вед. инженер-конструктор филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,

К.О. БАРЫШНИКОВ, *асп. кафедры ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, нач. сектора филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,

Е.В. ШАХОВЦЕВ, *асп. каф. экономики, управления и оценки МАОК, вед. инженер-технолог филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*

mkoptenkov@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

НОУ ВПО «Международная академия оценки и консалтинга» (МАОК),
117418, Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 65, к. 1

ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» –
«Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова»,
111123, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55

В НИИ прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова ведется разработка малогабаритного волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) с расширенным диапазоном рабочих температур для применения в составе скважинного прибора инклинометра. Как известно, максимальная рабочая температура скважинного прибора инклинометра определяет предельную глубину скважины, на которой могут проводиться измерения геологических параметров без дополнительной тепловой защиты. В разработанных ранее в НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова инклинометрах в качестве чувствительных элементов применялись динамически-настраиваемые гироскопы (ДНГ). Замена ДНГ на ВОГ позволяет повысить вибростойкость и ударопрочность скважинного прибора инклинометра, сохранив точностные характеристики и понизив общую стоимость прибора. Применение в составе скважинного прибора, разрабатываемого ВОГ с расширенным диапазоном рабочих температур, позволит, кроме вышеперечисленных достоинств, также измерять геологические параметры скважин большей глубины, что повысит его привлекательность на рынке.

Основные технические характеристики ВОГ:

1. Диапазон рабочих температур от -10° до $+120^{\circ}$ °C.
2. Габариты прибора с продольной осью $\varnothing 26$ мм и $h = 50$ мм.
3. Габариты прибора с поперечной осью $\varnothing 26$ мм и $h = 52$ мм.
4. Класс точности прибора 10 град/час.
5. Потребляемая мощность не более 1 Вт.

Разрабатываемый ВОГ построен по «минимальной конфигурации» и включает в себя два разветвителя, поляризатор, фазовый модулятор, катушку с оптоволоконным контуром, электронную плату, источник излучения и фотодетектор. Для создания чувствительной катушки используется анизотропное одномодовое оптическое волокно со специальным высокотемпературным покрытием, а также микроструктурированное оптическое волокно.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, оптико-физическая схема, малогабаритный, расширенным диапазоном рабочих температур.

Принцип действия ВОГ

Принцип действия оптического гироскопа основан на «вихревом» эффекте Саньяка. Сущность вихревого эффекта заключается в следующем. Если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре фазовые набегі обоих лучей, прошедших весь контур, будут одина-

ковыми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости контура, фазовые набегі лучей неодинаковы, а разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура.

На рис. 1 изображен плоский замкнутый оптический контур произвольной формы, в котором распространяются в противоположных направлениях две световые волны 1 и 2. Плоскость контура перпендикулярна оси

вращения, проходящей через произвольную точку O . Угловую скорость вращения контура обозначим Ω .

Если относительное запаздывание встречных волн, возникающее при вращении, выразить через разность фаз встречных волн, то она составит

$$\Delta\varphi_c = \omega \cdot \Delta\tau = \frac{4 \cdot \omega \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot v \cdot S}{c^2} \cdot \Omega = \frac{8 \cdot \pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega,$$

где $\omega = 2\pi\nu$, $\lambda = c/\nu$.

Разность фаз $\Delta\varphi_c$ является фазой Саньяка. Как видно, фаза Саньяка пропорциональна угловой скорости вращения контура.

Возможность создания реального ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового оптоволокна с малым затуханием, что определяет уникальные свойства прибора. К этим свойствам относят:

- высокую чувствительность;
- малые габариты и массу;
- низкую стоимость производства при массовом изготовлении;
- малое энергопотребление;
- практически мгновенную готовность к работе;
- работоспособность в условиях высоких механических перегрузок;

Эти уникальные преимущества позволяют успешно разрабатывать не только высокоточные ВОГ для систем управления космическими и летательными аппаратами, но и недорогих ВОГ небольшой точности для применения в таких областях, как инклинометрия и робототехника [1]. Простота и гибкость конструктивного исполнения позволяет заключать оптический контур ВОГ в корпуса различной геометрии (например, в вытянутый цилиндр), что идеально подходит для нужд инклинометрии.

Инклинометрические исследования

Инклинометрические исследования – это измерения зенитного угла и азимута скважины в функции ее глубины.

Инклинометрические исследования проводят при подъеме скважинного прибора в вертикальных скважинах глубиной свыше 300 м и в наклонных скважинах глубиной свыше 100 м для решения задач:

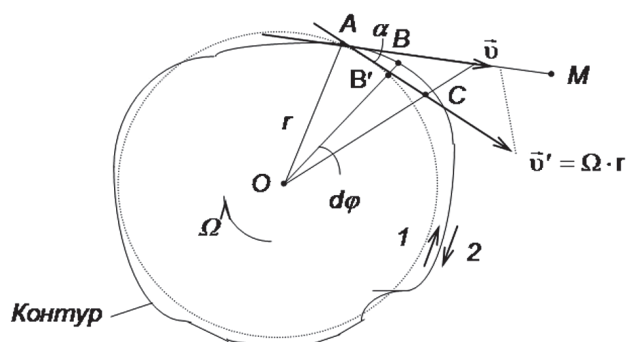


Рис. 1. Кинематическая схема вихревого эффекта Саньяка

Fig. 1. A cinematic scheme of Sanyak swirling effectt

- контроля заданного направления оси ствола скважины в пространстве проектному в процессе бурения;
- выделения участков перегибов оси ствола скважины, которые могут вызывать осложнения при бурении;
- получения исходных данных для геологических построений, в том числе определения истинных глубин залегания продуктивных пластов, для интерпретации данных магнитного каротажа и пластовой наклонотометрии.

Исследования выполняют магнитными (точечными и непрерывными) в необсаженных скважинах и гироскопическими инклинометрами [2] в необсаженных и обсаженных скважинах.

Инклинометр позволяет измерять основные геофизические параметры буровой скважины:

- 1) зенитного угла, необходимого для определения отклонения буровой скважины от вертикали;
- 2) апсидального угла (угла разворота вокруг продольной оси скважинного прибора относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось ствола скважины), необходимого для определения профиля скважины в подземном пространстве;
- 3) географического азимута, необходимого для определения профиля скважины в географических координатах;
- 4) магнитного азимута, необходимого для определения профиля скважины по магнитному азимуту (в немагнитных средах);

5) напряженности и ориентации магнитного поля относительно географического меридиана, необходимых для определения расположения магнитных масс (магнитных руд, старых обсадных скважин и др.) относительно исследуемой скважины;

6) температуры, необходимой для останова погружения скважинного прибора по причине достижения предельной температуры его работы.

Как известно, максимальная рабочая температура скважинного прибора инклинометра определяет предельную глубину скважины, на которой могут проводиться измерения геологических параметров без дополнительной тепловой защиты.

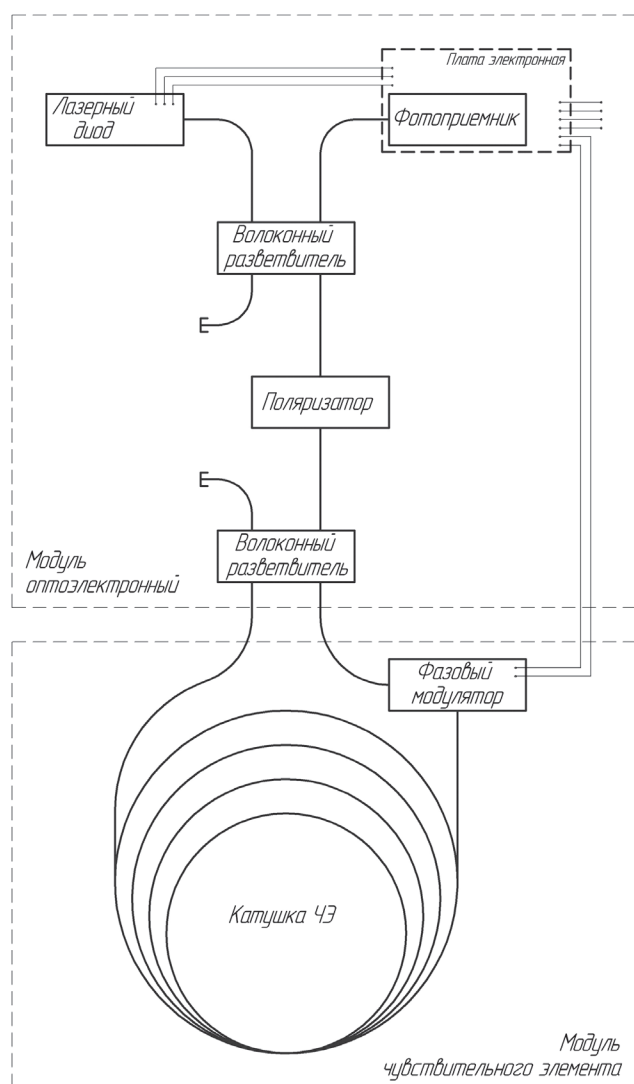


Рис. 2. Структурная схема ВОГ
Fig. 2. A FOG structure scheme

В разработанных ранее в НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова инклинометрах в качестве чувствительных элементов применялись динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ). Замена ДНГ на ВОГ позволяет повысить вибростойкость и ударопрочность скважинного прибора инклинометра, сохранив точностные характеристики и понизив общую стоимость прибора.

ВОГ с расширенным диапазоном рабочих температур

Применение в составе скважинного прибора разрабатываемого ВОГ с расширенным диапазоном рабочих температур позволит также измерять геологические параметры скважин большей глубины, что повысит его привлекательность на рынке.

Основные технические характеристики ВОГ:

- 1) Диапазон рабочих температур от -10 до $+120$ °С.
- 2) Габариты прибора с продольной осью $\varnothing 26$ мм и $h = 50$ мм.
- 3) Габариты прибора с поперечной осью $\varnothing 26$ мм и $h = 52$ мм.
- 4) Класс точности прибора 10 град/час.
- 5) Потребляемая мощность не более 1 Вт.

Разрабатываемый ВОГ построен по «минимальной конфигурации» [3] (рис. 2) и включает в себя два разветвителя, поляризатор, фазовый модулятор, катушку с оптоволоконным контуром, электронную плату, источник излучения и фотодетектор.

Каждый из вышеперечисленных элементов существенно изменяет свои параметры при изменении температуры, что ставит перед разработчиками задачу выбора оптимальной элементной базы.

ВОГ, построенные по «минимальной конфигурации», наиболее просты в изготовлении и обладают наименьшей возможной стоимостью. Использование интегрально-оптических схем (ИОС) не оправдано в условиях воздействия высоких температур, так как при стыковке оптоволокна к кристаллу ИОС применяется специальный оптический клей, который не способен выдерживать темпера-

туры выше 80 °С. Отсутствие ИОС значительно упрощает разработку алгоритмов термокомпенсации ВОГ.

Для разработки ВОГ с расширенным диапазоном рабочих температур необходимо решить 2 принципиальные задачи:

1. Выбор правильной элементной базы.
2. Разработка алгоритмов термокомпенсации.

Элементная база

В качестве материала оптического контура чувствительной катушки используется анизотропное одномодовое оптическое волокно со специальным высокотемпературным покрытием. Ведутся работы по применению микроструктурированного оптического волокна.

Микроструктурированное оптическое волокно [4] имеет сложную структуру внешней оболочки, обладающую свойствами фотонного кристалла. Такая структура позволяет управлять в широких пределах такими характеристиками, как двулучепреломление, дисперсия, площадь поля моды. Возможности микроструктурированного оптоволокна позволяют получить идеальное сочетание параметров для малогабаритного волоконно-оптического гироскопа.

Основным недостатком микроструктурированного оптоволокна является высокая мощность потерь – около 50 дБ/км. Для малогабаритного ВОГ с небольшой длиной оптического контура (100 м) эта особенность не имеет такого большого влияния, как для высокоточных приборов с длинной контура порядка 2 км.

Фазовый модулятор выполнен из пьезокерамического кольца с намотанной на него петлей оптоволокна и располагается вблизи одного из концов катушки интерферометра ВОГ. В качестве основания для фазового модулятора используются пьезокерамические кольца ЦТСтБС-2, имеющие габариты $\varnothing 12 \times 6 \times 3$, а также кольца ЦТС-19, имеющие габариты $\varnothing 18 \times 10 \times 4$, производства фирмы «ЭЛПА».

Расщепитель излучения представляет собой волоконный сварной биконичес-

кий разветвитель. В качестве поляризатора используется волоконный поляризатор. Разветвитель и поляризатор будут изготовлены на установке по обработке оптических волокон VYTRAN GPX-3000 [5]. VYTRAN GPX-3000 – это уникальные многоцелевые платформы для изготовления сплавных соединений, волоконных объединителей, конусов, линз и других волоконно-оптических изделий.

Источником излучения является лазерный диод с излучением в инфракрасном диапазоне. В настоящее время широко применяют суперлюминесцентные источники излучения, но в связи с невозможностью применять такие источники при температурах выше 80° С выбраны лазерные диоды. Применяются лазерные диоды PL90A002STA и PL98A004FAA производства фирмы Laser Components.

Диоды PL90A002STA обладают следующими техническими характеристиками:

- длина волны 900 нм;
- мощность излучения 2 мВт;
- диапазон рабочих температур от –55 до +125 °С;
- мощность потребления 150 мВт.

Диоды PL98A004FAA обладают следующими техническими характеристиками:

- длина волны 980 нм;
- мощность излучения 4 мВт;
- диапазон рабочих температур от –55 до +125 °С;
- мощность потребления 190 мВт.

В качестве фотодетекторов используются фотодиоды BPW20RF и BPW24R, имеющие следующие технические характеристики:

- диапазон чувствительности 550–1040 нм;
- темновой ток, не более 30 нА;
- диапазон рабочих температур от –55 до +125 °С.

Все электронные компоненты, использованные при создании электронной схемы ВОГ, также имеют широкий температурный диапазон.

Выбранная элементная база способна обеспечить функционирование «минималь-

ной конфигурации» ВОГ в условиях воздействия заданных температур.

Алгоритмическая термокомпенсация

Для обеспечения алгоритмической компенсации воздействия температуры и отработки технологии управления фазовым модулятором создается макет высокотемпературного ВОГ. В настоящий момент проводятся испытания составных частей ВОГ на воздействие повышенной температуры и изменение параметров питания. Параллельно разрабатывается макет ВОГ.

Макет ВОГ позволит провести испытания с целью подтверждения правильности реализованных в макетируемом приборе принципиальных схемных решений, определения технических характеристик макета, соответствия примененных оптических элементов и ЭРИ требованиям, установленным ТУ на них, и отработки методов управления пьезокерамическим фазовым модулятором, а также с целью оценки запаса работоспособности прибора при различных видах воздействующих на него факторов. Также будет проверена чувствительность элементов макета к следующим физическим эффектам, влияющим на точность ВОГ:

1. Чувствительность к градиенту температур (эффект Шьюппа).
2. Электромагнитная чувствительность (эффект Фарадея).
3. Электрооптический эффект (эффект Керра).
4. Обратное рассеяние лучей, бегущих по и против часовой стрелки, когерентных и некогерентных на несовершенствах волокна (обратное рэлееское рассеяние).
5. Поляризационные эффекты.

Результаты работы

Создаваемый прибор имеет ряд уникальных преимуществ:

– Расширенный диапазон рабочих температур от -10 до $+120$ °С и малые габариты, что позволяет использовать его в инклинометрии.

– Применение инновационного микроструктурированного волокна, что расширяет возможности применения ВОГ благодаря его особым свойствам. Такие ВОГ могут применяться для создания бесплатформенных инерциальных систем навигации и инерциальных измерительных приборов космических аппаратов с большим сроком функционирования.

– Результаты, полученные при испытаниях макета ВОГ, помогут оценить возможность создания сверхвысокоприцезионных ВОГ с использованием микроструктурированного волокна. Представленные ВОГи будут применены в гибридном гиромагнитометрическом инклинометре разработки НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова.

Библиографический список

1. Терешин, В.Г. Перспективы использования волоконно-оптических гироскопов в инклинометрической технике / В.Г. Терешин, Г.А. Иванова // Вестник УГАТУ. – 2011. – № 1. С. 70–75.
2. Пат. Российская Федерация № 2178523 МПК8 E27B47/022 G01C19/00 Малогабаритный гироскопический инклинометр / Белов Р. А., Колесников А.А., Котов А.Н. Мезенцев А.П. заявитель и патентообладатель ФГУП «НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова». – № 99107865/28 ; заявл.04.06.1990 ; побул. 20.01.2002, Бюл. № 2. – 3с.: ил.
3. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
4. Филатов, Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: учеб. пособие / Ю.В. Филатов. – СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
5. Шереметьев, А.Г. Волоконно-оптический гироскоп / А.Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь, 1987.
6. Ландсберг, Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов / Ландсберг Г.С. – М.: ФИЗМАЛИ, 2003.
7. Products – GPX-3000 SERIES – VYTRAN LLC – Morganville, NJ 07751 USA, 2003 http://www.vytran.com/product/gpx-3000_series. – Загл. с экрана.
8. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light /John D. Joannopoulos, Steven G. Jonson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade – Princeton university press – 2008. – 286 p.
9. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 708 (1913); engl. – Sagnac G., The Luminiferous Ether is Detected as a Wind Effect Relative to the Ether Using a Uniformly Rotating Interferometer, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.74, Vol.1, 2008, ISSN 1654-9163
10. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 1410 (1913); engl. – Sagnac G., Regarding the Proof for the Existence of a Luminiferous Ether Using a Rotating Interferometer Experiment, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.77, Vol.1, 2008, ISSN 1654-9163

SMALL-SIZE FIBER-OPTIC GYROSCOPE

Balandin A.I., pg. BMSTU, chief engineer, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»;
Koptenkov M.I., pg. MSFU, a leading design engineer branch, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»;
Baryshnikov K.O., pg. BMSTU, head of sector, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»; **Shahovtsev E.V.**, pg. IAAC, a leading engineer technologist, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov».

mkoptenkov@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, st. Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005, Russia

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytitschi, Moscow reg., Russia

International Academy of Appraisal and Consulting (IAAC), st. Novocheryomushkinskaya, 65, k. 1 Moscow, 117418, Russia

«Center for Operation of Space Ground-Based Infrastructure»—«Scientific and Research Institute of Applied Mechanics named after Academician V.I. Kuznetsov», Aviamotornaya st., house 55, Moscow, 111123, Russia

It is well known that the temperature threshold of the inclinometer's borehole device defines limiting depth of a borehole on which measurements of geological parameters without additional thermal protection can be carried out. Dynamically adjusted gyroscopes (DAG) were used as sensitive elements in inclinometers, which were developed earlier in scientific research institute of applied mechanics named after academician Kuznetsov. Replacement of DAG by FOG allows to increase vibration resistance and impact resistance of the inclinometer's borehole device while keeping accuracy characteristics and lowering a total cost of the device. Application of developed FOG with an extended temperature range within borehole device will allow, apart from advantages mentioned above, also to measure geological parameters of deeper boreholes that will increase its appeal in the market.

FOG's basic technical specifications:

- 1) Temperature range: from a -10° to $+120^{\circ}\text{C}$.
- 2) Device dimensions with a longitudinal axis: diameter of 26 mm and height of 50 mm.
- 3) Device dimensions with a cross-section axis: diameter of 26 mm and height of 52 mm.
- 4) Class of accuracy: 10 hails/hour.
- 5) Power consumption: $< 1\text{ W}$.

Developed FOG is constructed using the «minimum configuration» and includes two splitters, a polarizer, a phase modulator, a coil with a fiber-optical contour, an electronic circuit plate, a source of light and the photodetector. Anisotropic singlemode optical fiber with a special high-temperature coating or the microstructured optical fiber will be used for creation of the sensitive coil.

Keywords: Fiber optic gyroscope, optical-physical scheme, small-size device, extended temperature range.

References

1. Tereshin V.G., Ivanova G.A. *Perspektivy ispol'zovaniya volokonno-opticheskikh giroskopov v inklinometricheskoy tekhnike* [Prospects of using fiber-optic gyroscopes in inclinometer technique], Vestnik UGATU Publ., 2011. № 1. p. 70-75.
2. Belov R.A., Kolesnikov A.A., Kotov A.N., Mezentsev A.P. *Malogabaritnyy giroskopicheskiy inklinometr* [Small-sized gyroscopic inclinometer]. Patent RF, no. 2178523, 2002.
3. *Volokonno-opticheskie datchiki. Vodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Fiber Optic Sensors. Introductory course for engineers and scientists] red. E. Udda. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 520 p
4. Filatov Yu.V. *Volokonno-opticheskiy giroskop* [Fiber-optic gyroscope]. St. Petersburg: GETU «LETI» Publ., 2003.
5. Sheremet'ev A.G. *Volokonno-opticheskiy giroskop* [Fiber-optic gyroscope]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987.
6. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Tutorial: For universities. 6 th ed. stereotypes. Moscow: FIZMALI Publ., 2003.
7. Products – GPX-3000 SERIES / VYTRAN LLC – Morganville, NJ 07751 USA, 2003 – Available at: http://www.vytran.com/product/gpx-3000_series (accessed 15 Mach 2014)
8. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light /John D. Joannopoulos, Steven G. Jonson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade – Princeton university press – 2008. – 286 p.
9. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 708 (1913); engl. – Sagnac G., The Luminiferous Ether is Detected as a Wind Effect Relative to the Ether Using a Uniformly Rotating Interferometer, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.74, Vol.1, 2008, ISSN 1654-9163
10. Sagnac M G C.R. Acad. Sci 157 1410 (1913); engl. – Sagnac G., Regarding the Proof for the Existence of a Luminiferous Ether Using a Rotating Interferometer Experiment, THE ABRAHAM ZELMANOV JOURNAL, p.77, Vol.1, 2008, ISSN 1654-9163