

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ИНКЛИНОМЕТРОВ

**БАДАМШИНА ЭЛЬМИРА БАРИЕВНА,
ИЩЕНКО ЕВГЕНИЙ ФЕДОРОВИЧ,
ЛЕПЕШКИН ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ**

АННОТАЦИЯ

Исследованы кольцевые оптические резонаторы, используемые в лазерных инклинометрах. Проведены расчеты и сравнение параметров трех резонаторов, после этого был выбран один из них, полностью удовлетворяющий требованиям по габаритным размерам и устойчивости характеристик, который рекомендовано использовать при конструировании лазерного инклинометра гироскопического типа. При этом повысится не только точность, но и экологическая безопасность.

Ключевые слова: кольцевые оптические резонаторы; лазерные инклинометры гироскопического типа; устойчивость резонаторов; чувствительности осевого контура к разъюстировкам; метод осевого контура; точность и безопасность.

INVESTIGATION AND COMPARISON OF PARAMETERS OF OPTICAL RING RESONATORS FOR LASER INCLINOMETERS

**BADAMSHINA E. B.,
ISHENKO E. F.,
LEPESHKIN D. V.**

ABSTRACT

Three optical ring resonators for laser inclinometers are investigation. Calculations and comparison of parameters of resonators was perform. As a result, one of them was chosen fully meeting the requirements on dimensions and stability of characteristics that we recommend to use by design of a laser inclinometer of a gyroscopic type.

Keywords: optical ring resonators; laser inclinometer of a gyroscopic type; stability of the resonator; comparison criteria of optical resonators; axial contour sensitivity to misalignment; axial contour method; information optics.

ВВЕДЕНИЕ

При добыче нефти, в случае истощения источника, требуется бурить дополнительный канал по отводу нефти под строго определенным углом из дна скважины. Для этой цели необходимы инклинометры – приборы, используемые для определения угла и азимута искривления буровой скважины. При этом инклинометр помещается непосредственно около бура, что создает ограничение на размер прибора, в качестве которого используется лазерный гироскоп с кольцевым резонатором. Такое устройство хорошо зарекомендовало себя как прибор с высокой точностью измерения угловой координаты. В виду ограничения размеров прибора было предложено исследовать и сравнить три кольцевых оптических резонатора.

Следует отметить, что недостаточная точность при бурении приведёт не только к экономическим издержкам. Нефть может попасть в грунтовые воды и на повестку дня выходит вопрос экологической безопасности. Сегодня кольцевые лазеры обеспечивают наименьшую погрешность измерений по сравнению с другими средствами угловых измерений, а значит и максимальную безопасность.

Принципы работы инклинометров

Инклинометр (от лат. *incline* – наклоняю и метр) – прибор, предназначенный для определения угла и азимута искривления буровой скважины с целью контроля её пространственного положения [1]. По

методам измерений инклинометры делятся на две группы [2]:

- непосредственных измерений с использованием гравитационного поля Земли, геомагнитного поля, гироскопического эффекта и телезондирования;
- косвенных измерений с использованием методов ориентирования с поверхности, последовательных ходов, сейсмоки, радиолокации, магнитометрического метода.

Регистрация замеров может производиться непосредственно в инклинометре с использованием механических, фоторегистрационных, электрометрических, химических способов или дистанционно.

В зависимости от вида скважины применяются инклинометры различного типа. В скважинах, обсаженных металлическими трубами, используются электрические инклинометры. В корпусе такого инклинометра помещается свободно подвешенная рамка, которая по отвесу располагается горизонтально. На ней имеется буссоль для измерения азимута и указатель наклона. Стрелка буссоли и указатель наклона рамки скользят по реохордам азимутам и углов наклона, которые поочередно можно подключать к токовой линии инклинометра. Стрелка и указатель передают напряжение с реохордов, пропорциональное азимуту или углу наклона.

В скважинах, обсаженных металлическими трубами, измерение азимута и угла проводят гироскопическими инклинометрами. Принцип работы этих приборов основан на свойстве гироскопа сохранять

неизменной в пространстве ось вращения. В инклинометре два гироскопа: один для измерения азимутов, другой – для измерения углов наклона. Причем особый интерес представляют лазерные гироскопы, обеспечивающие малую погрешность измерений. Схема инклинометра такого типа представлена на рисунке 1, где 1, 2, 3, 4, 6, 7 – зеркала резонатора; 5 и 8 – осевые контуры. Оптический резонатор каждого лазерного гироскопа образован четырьмя зеркалами

(рисунок 1 а), причем два зеркала (2 и 4) являются общими для двух гироскопов. Если смотреть на такой инклинометр сверху, то видны осевые контуры двух резонаторов (5 и 8), которые расположены под углом друг к другу (рисунок 1 б). В сечении А-А получается ромбовидный осевой контур, образованный четырьмя зеркалами. С помощью систем обработки информации определяются углы между направлением скважины и осями вращения гироскопов.

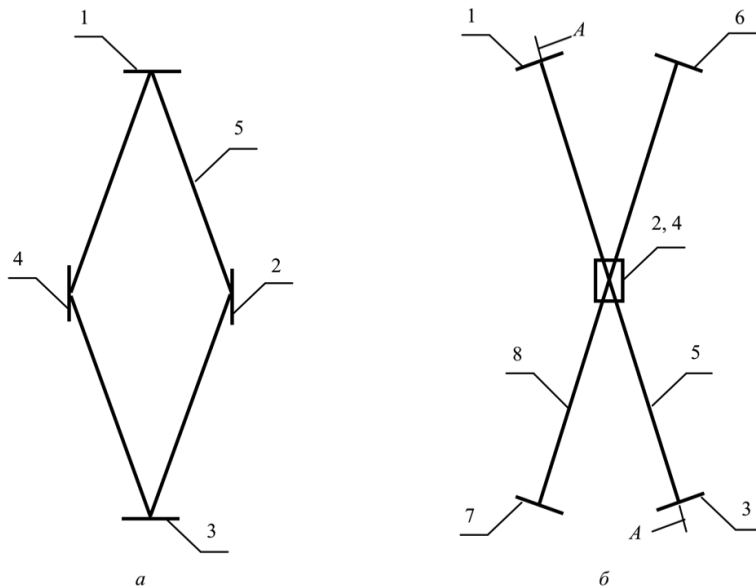


Рисунок 1 – Схема инклинометра гироскопического типа:
а – сечение А-А; б – вид сверху

Алгоритмы программного расчета параметров кольцевых резонаторов

При проектировании резонаторов для новых типов лазерных приборов основное внимание уделяется габаритным размерам устройства, требованию по выходным характеристикам излучения, генерируемого лазером, и учету влияния внешних факторов на излучение. Обычно габариты системы автоматически ограничивают выбор оптической схемы несколькими конфигурациями резонаторов, поэтому основной задачей проектировки является определение таких параметров оптических элементов, чтобы они удовлетворяли следующим условиям:

1) устойчивость резонатора в требуемом температурном диапазоне, чтобы любой внеосевой параксиальный луч после ряда отражений не выходил из полости резонатора,

2) обеспечение устойчивых характеристик при установленных допусках и ограничениях.

Для этого в программу изначально закладываются характеристики нескольких оптических схем, после чего производится их расчет и сравнение для определения наиболее оптимальной конфигурации, удовлетворяющей поставленным требованиям.

Алгоритмы программного расчета состоят в следующем:

1. Расчет области устойчивости резонаторов [3].

2. Отсев неустойчивых резонаторов или, если позволяют требуемые ограничения, корректировка параметров отражательных элементов (интерференционных зеркал) для вывода резонатора в центр области устойчивости.

3. Расчет пространственных характеристик собственных волн резонаторов [3].

4. Отсев резонаторов с такими пространственными характеристиками, которые не удовлетворяют поставленным требованиям (например, по габаритным размерам).

5. Расчет чувствительности осевой линии к разъюстировкам, используя метод осевого контура [4].

6. Определение допусков на положение зеркал резонаторов [5].

7. Расчет критериев сравнения [6].

8. Расчет величины астигматизма (т.е. разницы между размерами пятен основной моды в перетяжке по двум ортогональным осям X и Y).

Отметим, что суть метода осевого контура состоит в фиксировании деформации осевой линии резонатора. При этом принимается во внимание, что любое изменение характеристик собственных волн прямо связано с деформацией осевой линии резонатора. Чем больше смещение осевой линии на каком-либо ответственном участке, тем значительнее последствия разъюстировки. В основу определе-

ния величины допуска закладывается такое условие, чтобы максимальная деформация осевого контура не превышала некоторую меру M , которая выбирается, исходя из функциональных особенностей резонатора. В качестве последней может быть выбрано линейное смещение оси в каком-либо ответственном поперечном сечении резонатора, максимальное линейное смещение оси по всей длине осевого контура, средний модуль или средний квадрат смещения оси на определенном участке резонатора, где размещена активная среда или другой оптический элемент, или разворот оси в ответственном сечении резонатора.

Ведем количественную характеристику чувствительности резонатора к какой-либо возможной i -ой разъюстировке его зеркал для конкретного критического сечения $k - \mu_{ik}$ [4]. Эту характеристику определим как отношение величины, для которой указана мера K_k к величине i -ой разъюстивающей подвижки зеркал. Расчет допусков проводится независимо для двух ортогональных плоскостей: для плоскости X , содержащей осевую контур, и плоскости Y .

Общее выражение для определения допуска p_i на данную i -ую разъюстивающую подвижку зеркала таково [4]:

$$p = \frac{K_k}{\sqrt{n \cdot |\mu_{ik}|}}, \quad (1)$$

где K_k – взятая при проектировании мера деформации осевого контура; n – число разъюстирующих подвижек.

Если резонатор содержит N зеркал, из которых N' плоских, то число разъюстирующих подвижек (n) в общем случае для плоскости X равно $3N - N'$, а для плоскости Y : $2N - N'$. Формула (1) естественно должна использоваться с учетом различных размерностей величин K_k , μ_{ik} и p_i .

Рассмотрим линейные и угловые подвижки сферического зеркала, приводящие к разъюстировкам резонатора, то есть к искажению осевого контура. Введем для каждого зеркала вспомогательную декартову систему координат ξ, η, ζ , начало которой совмещено с центром отражающей поверхности зеркала, и изобразим её на рисунке 2, где 1 – рассматриваемое сферическое зеркало, 2 и 3 – падающий и отраженный лучи соответственно. Ось ξ располагается в плоскости осевого контура касательно к отражающей поверхности; ось η также касатель-

ная к отражающей поверхности, но располагается ортогонально к плоскости осевого контура; ось ζ совпадает с нормалью к отражающей поверхности. Могут учитываться линейные подвижки вдоль введенных осей: $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$, а также повороты вокруг этих осей: $\delta\xi, \delta\eta, \delta\zeta$. Смещения $\Delta\xi, \Delta\zeta$ сферических зеркал и поворот $\delta\eta$ приведут к деформации осевого контура в его плоскости X ; смещение $\Delta\eta$ и поворот $\delta\xi$ приведут к деформации осевого контура в ортогональной плоскости Y . Поворот сферического или плоского зеркала вокруг своей нормали $\delta\zeta$ или смещения плоского зеркала $\Delta\xi, \Delta\eta$, очевидно, не вызовут разъюстировки резонатора.

Кроме того, при использовании метода осевого контура не учитывается влияние дифракции, поэтому для того, чтобы результаты расчета соответствовали практическим данным, требуется уменьшить влияние дифракции в оптическом резонаторе. Не смотря на это, применение программного расчета позволяет за короткое время получить подробную информацию о характеристиках кольцевых резонаторов.

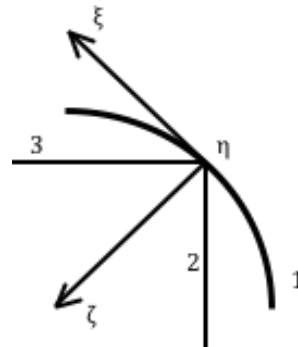


Рисунок 2 – Оси разъюстирующих подвижек зеркала

Исследование и сравнение параметров кольцевых резонаторов

Проведем исследование и сравнение трех кольцевых резонаторов, которые, предположительно, будут использованы при конструировании лазерного инклинометра, и представим их на рисунке 3. Здесь 1, 2, 3 – зеркала, образующие резонатор, причем дугой обозначаются сферические зеркала, прямой линией – плоские. Заданы следующие параметры оптических схем: для №1 $L_1 = L_3 = 80$ мм, $L_2 = 30$ мм, для №2 $H = 30$ мм, $L_2 = 120$ мм, для №3 $H = 30$ мм, $L_2 = 120$ мм.

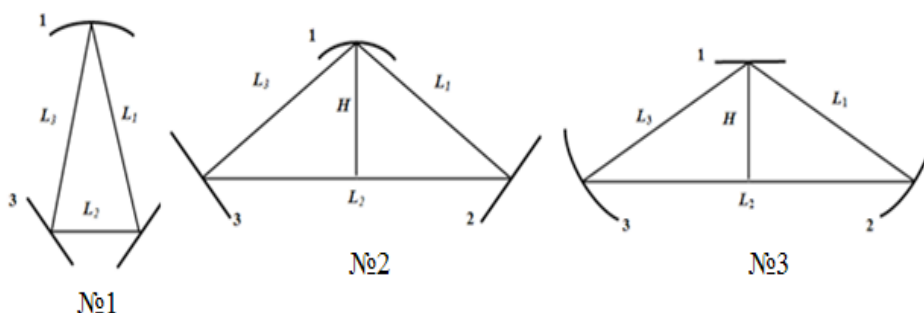


Рисунок 3 – Осевые контуры кольцевых резонаторов

Для трех резонаторов рассчитывались следующие характеристики: радиусы кривизны сферических зеркал в области устойчивости резонатора с учетом коэффициента надежности, допуски на положение зеркал, чувствительность зеркал к разъюстировкам, пространственные параметры основной моды, спектр собственных частот резонаторов. Для этого был использован программный расчет, алгоритмы которого подробно рассмотрены в [7].

После получения характеристик оптических схем резонаторов, удовлетворяющих техническому заданию, требуется их сравнить для подбора оптимальной по практическим соображениям конфигурации оптической схемы. Для облегчения сравнения оптических резонаторов авторами были предложены следующие критерии [6]:

1) По самому критичному зеркалу резонатора. Чем меньший допуск на постановку зеркал имеет резонатор, тем, соответственно, он хуже.

2) По отношению суммарных допусков на положение зеркал резонаторов. Сначала складываются допуски на линейные подвижки всех зеркал для каждого резонатора, потом аналогичные вычисления производятся для угловых подвижек. Затем вычис-

ляется так называемый коэффициент сравнения $\beta_{a,b}$:

$$\beta_{a,b} = \frac{\left(1 + \sum_i |\Delta_{i,a}|\right) \left(1 + \sum_i |\delta_{i,a}|\right)}{\left(1 + \sum_i |\Delta_{i,b}|\right) \left(1 + \sum_i |\delta_{i,b}|\right)}, \quad (2)$$

где a и b – это порядковые номера сравниваемых резонаторов, i – номер разъюстировки, Δ – характеризует линейные подвижки, а δ – угловые. Если полученная величина больше единицы, то резонатор a лучше b , если меньше, то наоборот. Чем ближе коэффициент сравнения к единице, тем более близки характеристики резонаторов.

3) По величине астигматизма l (разница между размерами пятен основной моды в перетяжке по осям X и Y). Чем меньше астигматизм, тем лучше резонатор.

Представим некоторые результаты программного расчета в виде таблицы. Знак « ∞ » означает, что допуск можно взять грубо. Допуски для зеркала 3, естественно, такие же, что и для зеркала 2 из-за симметрии систем.

Таблица 1.

Некоторые результаты программного расчета

Параметр	№ 1		№ 2		№ 3	
	Зеркало 1	Зеркало 2	Зеркало 1	Зеркало 2	Зеркало 1	Зеркало 2
$\Delta\xi$, мм	2.002	∞	0.195	∞	∞	1.583
$\Delta\zeta$, мм	2.016	0.497	0.422	0.309	0.317	1.252
$\Delta\eta$, мм	3.922	∞	1.088	∞	∞	0.815
$\delta\xi'$	2.247	2.865	10.688	4.911	9.559	4.006
$\delta\zeta'$	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$\delta\eta'$	11.473	13.612	1.923	4.074	8.687	7.773
l , мм	0.003		0.130		0.003	
$\beta_{1,b}$	1		4.5		1.3	
$\beta_{2,b}$	0.2		1		0.3	
$\beta_{3,b}$	0.8		3.5		1	

В данном случае расчет и оценка представленных оптических схем производились двумя способами: с помощью программного расчета и отдельно специалистами традиционным способом.

По первому критерию из таблицы видно, что самым минимальным допуском на положение обладает первое зеркало резонатора № 2, т.е. этот резонатор наиболее критичен к постановке зеркал, поэтому он хуже остальных. Резонатор № 3 более чувствителен к линейным подвижкам и менее к угловым, чем № 1. При сравнении резонаторов по второму критерию видно, что величина $\beta_{1,2} > 1$, поэтому резонатор № 1 лучше, чем № 2, с другой стороны $\beta_{2,3} < 1$, значит № 2 хуже, чем № 3. Коэффициент сравнения $\beta_{1,3} > 1$, следовательно, по характеристикам резонатор № 1, лучше, чем № 3. Если сравнивать резонаторы, пользуясь третьим критерием, то по таблице видно, что величина астигматизма для резонаторов № 1 и одинакова, а для

резонатора № 2 много больше. В результате было установлено, что резонатор, образованный одним сферическим и двумя плоскими зеркалами с тупым углом при вершине (№ 2), значительно уступает по всем характеристикам остальным резонаторам. Самым лучшим оказался резонатор, образованный одним сферическим и двумя плоскими зеркалами с острым углом при вершине (№ 1). Именно этот резонатор было рекомендовано использовать при конструировании лазерного инклинометра гироскопического типа.

Заключение

После анализа и сравнения данных, полученных с помощью программного расчета и рассчитанных традиционным способом, было установлено их полное соответствие. Однако необходимо отметить, что время, затрачиваемое на программный расчет,

существенно меньше, чем требуется для проведения анализа и расчета резонаторов без использования программы. В связи с этим применение программного расчета при проектировании оптических резонаторов более целесообразно, так как позволяет проводить расчеты и оценку значительно быстрее, чем вручную.

В результате проведенного исследования и сравнения оптических схем трех кольцевых резонаторов был выбран один из них, полностью удовлетворяющий требованиям по габаритным размерам и устойчивости характеристик, который рекомендовано использовать при конструировании лазерного инклинометра гироскопического типа.

Список литературы

1. *Исаченко В. Х.* Инклинометрия скважин. – М: Недра, 1987. – 216 с.
2. *Михайловский В. Н., Иванов С. К.* Измерение кривизны скважин. – Киев: Издательство Академии наук УССР, 1960. – 182 с.
3. *Быков В. П., Силичев О. О.* Лазерные резонаторы. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
4. *Ищенко Е. Ф., Рамазанова Г. С.* Анализ разъюстированных открытых оптических резонаторов. – М.: Издательство МЭИ, 1993. – 82 с.
5. *Бадаמיшина Э. Б., Ищенко Е. Ф., Лепешкин Д. В.* Методика определения допусков на положение зеркал оптического резонатора // Вестник СПбО АИН – 2011. – Т. №2. – с.229–235.
6. *Бадамишина Э. Б.* Критерии сравнения оптических резонаторов для системы автоматического проектирования // Вестник МЭИ. 2007. – № 4. – с.109–112.
7. *Бадамишина Э. Б.* Методы компенсации ошибок изготовления кольцевых оптических резонаторов: Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – М., 2009. – 165 с.