

– от 0,1 до 2% для шахтной печи, работающей при 980 °С,

– от 2 до 15% для толкательной печи, работающей при 955 °С.

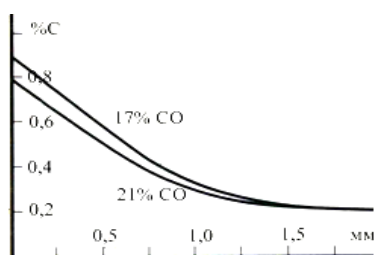


Рисунок 1 – Зависимость профиля углеродного потенциала от содержания CO

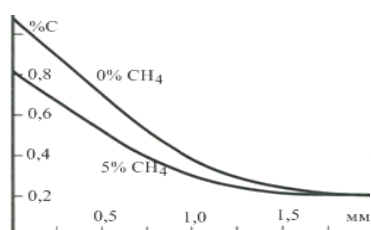


Рисунок 2 – Зависимость профиля углеродного потенциала от содержания CH<sub>4</sub>

Количество свободного CH<sub>4</sub> в печи является функцией утечки в печи, каталитических свойств печи, температуры, площади поверхности загрузки и требуемого углеродного потенциала. В конечном счете, конечно, уровень свободного CH<sub>4</sub> во многом является результатом количества обогащающего газа, добавляемого в атмосферу.

При низких уровнях свободного CH<sub>4</sub> (< 1 %) в печной атмосфере его эффекты можно смело игнорировать. Однако по мере увеличения содержания CH<sub>4</sub> эффект постепенно становится более значительным, пока на уровнях более 10 % он не станет доминирующей силой цементации.

В данном случае рассматривалось влияние содержания свободного CH<sub>4</sub> в диапазоне от 0 до 5 %. Как показано на рисунке 2 изменение в содержании свободного CH<sub>4</sub> оказывает гораздо большее влияние на результаты науглероживания, чем любой из других параметров.

УДК 531.383

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ (ВТГ) С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Распопов В.Я.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

По сравнению с другими типами гироскопов волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) обладает следующими преимуществами: рабочий

Фактически, свободный CH<sub>4</sub> является основной причиной изменения как глубины науглероживания, так и величины поверхностного углерода, наблюдаемого в процессе цементации.

Основная причина, по которой кислородные зонды настолько популярны в настоящее время, заключается в том, что им не требуется транспортировка пробы газа из печи в газоанализатор анализатор. Действительно, неисправности могут возникать и случаются в системах отбора проб газов ИК-анализаторов, но риски можно минимизировать еще на стадии проектирования и монтажа системы, которая будет такой же надежной, как и кислородный зонд.

Основными источниками потенциальных неисправностей при использовании инфракрасных газоанализаторов, являются конденсация воды в любом месте системы и склонность к образованию сажи в газоотборной трубке, когда образец проходит через стенку печи..

Осаждение сажи предотвращается сочетанием быстрого охлаждения образца и выбора материала зонда для пробы, проходящего через стенку, который должен быть достаточно гладким, чтобы предотвратить зарождение углеродных частиц. Хорошо подходят обычные трубки из кварцевого стекла.

Системы отбора проб требуют использования фильтров. Для контроля расхода площади поверхности фильтра в системе отбора пробы могут использоваться датчики потока. Они могут показывать необходимость замены фильтрующих материалов.

Газоаналитические многоточечные системы используются для снижения затрат на точку измерения и обычно конкурируют с системами на основе кислородного зонда. Но для повышения точности и снижения времени отклика измерений мультигазовая многоточечная система может объединяться с системой, использующей кислородные зонды.

### Литература

1. Grochowski J. New Facility and Improved Control System for Furnace Atmosphere Processing at Commercial Heat Treating Plant / J. Grochowski // Industrial Heating. – 1994. – № 9. – P 151–154.

ресурс достигает 15000 часов и более; небольшие вес и габариты (20–80 г при диаметре 10–40 мм); малая энергоёмкость (несколько Вт); малое время

готовности (1–5 с.); сохранение работоспособности при кратковременном (2–5 с.) отключении электропитания; способность выдерживать большие механические нагрузки; стойкость к ионизирующему излучению высокой энергии; высокое отношение – точность/себестоимость [1, 2, 3].

Принцип работы ВТГ основан на эффекте инертности упругих волн во вращающихся осесимметричных телах, открытый в 1890 году Г.Х. Брайеном [4]. В ВТГ осесимметричным телом является резонатор (чувствительный элемент) (рис. 1), в котором возбуждается упругая волна на 2-й моде колебаний с заданной амплитудой, которая стабилизируется с помощью системы автоматического управления амплитудой и фазой.

Эта стоячая волна (рис. 2) имеет четыре пучности  $a, g, e, c$ , расположенные на осях  $x, y$  и четыре узла  $b, h, f, d$  на осях  $x_1, y_1$ , в которых амплитуды колебаний максимальны и минимальны соответственно.

Первая вибрационная мода 1, 2 показана для двух моментов времени относительно недеформированной кромки резонатора, которая к концу полупериода переходит от эллипса 1 к эллипсу 2. Вращение гироскопа вокруг оси  $z$  приводит к возникновению сил инерции Кориолиса, которые вызывают смещение вибрационных пучностей относительно окружности кромки резонатора. То есть вращение резонатора вызывает вторичные вибрации в форме эллиптической моды 3, 4, для которой главные оси  $x_1, y_1$  расположены под углом  $45^\circ$  к осям  $x, y$ . Вибрация проходит от эллипса 3 к эллипсу 4 в конце полупериода. По осям  $x_1, y_1$  расположены измерители перемещений (детектирующие элементы) кромки резонатора, сигналы которых характеризуют угловую скорость и/или угол поворота вокруг оси  $z$ .

По осям  $x_1, y_1$  расположены измерители перемещений (детектирующие элементы) кромки резонатора, сигналы которых характеризуют угловую скорость и/или угол поворота вокруг оси  $z$ .

Для металлического резонатора ВТГ хорошим выбором является сплав 21НКМТ-ВИ [5], получающий определенную структуру в результате цикла термической обработки, обеспечивающей необходимый баланс между инварными и элинварными свойствами, высокую добротность резонатора и линейные термоупругие свойства.

Полусферическая и, отчасти, тороидальная формы резонаторов обладают важным свойством краевой локализации колебаний вблизи свободной кромки резонатора. Цилиндрический резонатор более прост в изготовлении, но в цилиндрической оболочке наблюдается, так называемый, вырожденный краевой эффект, который проявляется в уменьшении колебаний при удалении от свободной кромки резонатора. Ослабление этого эффекта достигается применением конструкции составного резонатора, который со стороны кромки

имеет цилиндрическую часть с большой толщиной по сравнению с цилиндрической частью, которую называют подвесом, сопрягаемой с донной частью резонатора.

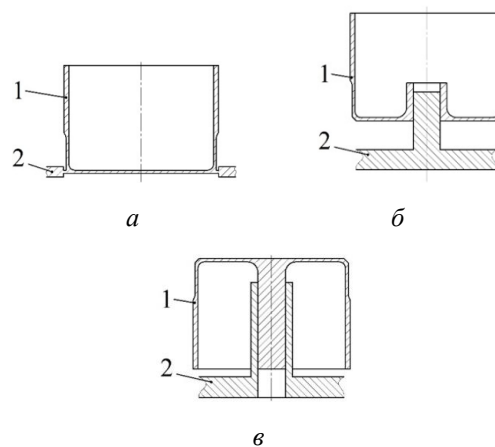


Рисунок 1 – Типовые формы резонаторов:  $a$  – «Стакан»;  $b$  – «Рюмка» («Бокал»);  $c$  – «Гриб»; 1 – резонатор; 2 – основание

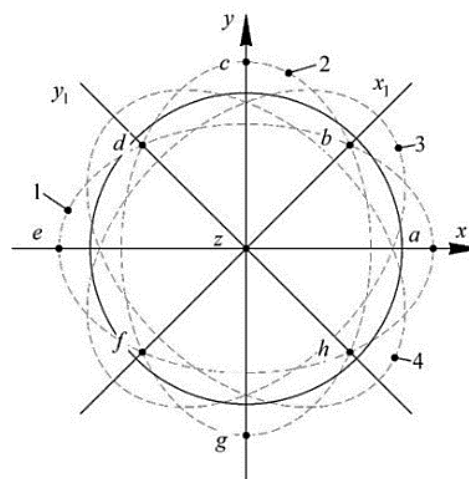


Рисунок 2 – Схема расположения первичных и вторичных вибраций резонатора: 1, 2, 3, 4 – эллиптические моды

Составной цилиндрический резонатор имеет, так называемые, резонансные размеры, при которых совпадают частоты разных модульных пар. Эти частоты могут быть выявлены изменением в широких пределах, при расчете резонатора, отношений между диаметром, длинами и толщинами частей резонатора. Очевидно, что размеры конструкции резонатора должны находиться в промежутках между их «резонансными размерами».

Дефекты изготовления резонатора приводят к расщеплению собственной частоты его рабочих колебаний по второй форме деформации на две близкие частоты. Такой дефект характеризуется разными значениями частот и ориентацией собственных осей и называется разночастотностью.

Скорость затухания колебаний резонатора зависит от ориентации волны, то есть резонатор имеет различные декременты затухания и соответствующее им направление осей. Такой дефект резонатора называется разнородностью. Устранение (уменьшение значений) этих дефектов достигается балансировкой резонатора.

Так как зона крепления (ножка, фланец) имеет повышенный уровень удельных потерь энергии колебаний, она должна быть расположена вне зоны рабочих колебаний резонатора. Необходимо обеспечить разнесение частот собственных колебаний резонатора от спектра частот, обусловленного узлом крепления.

Для возбуждения первичной вибрации применяются электростатические, магнитоэлектрические, электромагнитные, пьезоэлектрические датчики силы и др., а также их комбинации. В качестве датчиков перемещений используются в основном электростатические, магнитоэлектрические, пьезоэлектрические, оптические преобразователи. Предпочтительно использование преобразователей работающих и как датчики перемещений и как датчики силы. Например, в пьезоэлектрических преобразователях используются прямой и обратный пьезоэффекты.

ВТГ с металлическим резонатором может работать в режимах датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС) и датчика угла (ВТГ-ДУ) [5, 6].

На рис. 3 в соответствии с рис. 2 приведена функциональная схема работы гироскопа в режиме силовой компенсации в предположении, что в качестве преобразователей используются пьезоэлементы 1 (*a, b, c, d, e, f, g, h*), расположенные на одной из торцевых поверхностей 2 резонатора (рис.1.1 б, в). Генератор 3 электрических сигналов возбуждает пьезоэлементы 1*a, 1e*, расположенные по оси  $X$  пучностей первой вибрационной моды. Измерительный блок 4 сравнивает амплитуду первой вибрационной моды с заданным значением и передаёт на генератор 3 сигнал рассогласования, обеспечивая режим регулирования амплитуды. Вторая вибрационная мода при вращении гироскопа ориентирована по осям  $X_1, Y_1$ . Измерительный блок 5 принимает сигналы с пьезоэлементов 1*b, 1f*. Управляющий блок 6 принимает от блока 5 сигналы, пропорциональный амплитуде узла по оси  $X_1$  и формирует управляющий (компенсирующий) сигнал на пьезоэлементы 1*d, 1h*, расположенные по оси  $y_1$  (вторая ось узла второй вибрационной моды резонатора) для сведения к нулю амплитуды сигналов, детектированных блоком 5. Этот блок на основе компенсирующего сигнала вырабатывает сигнал, пропорциональный угловой скорости.

Для работы в режиме ВТГ-ДУ необходимо отключить генератор. Резонатор работает на «вы-

бе» и в течение некоторого времени, пока фиксируется устойчивый сигнал на выходе, можно измерить угол поворота основания.

Технические характеристики ВТГ-ДУС с металлическим резонатором сопоставимы с импортными образцами и могут быть применены в системах ориентации, стабилизации и навигации среднего класса точности [5, 7, 8].

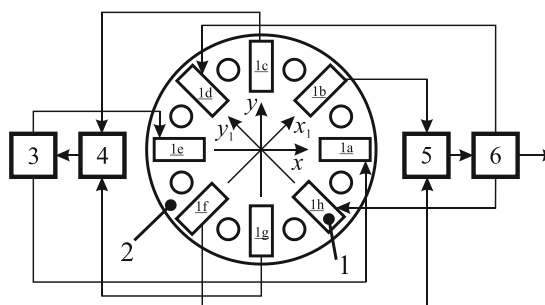


Рисунок 3 – Функциональная схема электроники режима силовой компенсации:

1 – пьезоэлемент (8 шт.), 2 – резонатор, 3 – генератор, 4, 5 – измерительные блоки, 6 – управляющий блок

## Литература

1. Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V.A., Scherban V.I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG//Proc/ Symposium Gyro Technology/ - 2006 – Stuttgart. – P. 4.0 – 4.7.
2. Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A.; Barbashov A.S., Kovalenko V.A.; Scherban V.I., Scerban V.I., Marusyk P.I. Metallic Resonator CVG Thermophysical Parameter Optimization and Temperature Test Results // Proc. Of XIV International Conference on Integrated Navigation Systems (28-30 May 2007. St-Petersburg). – St-Petersburg: “Electropribor”. 2007. – P. 74–77.
3. Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A.; Barbashov A.S., et al. Improved accuracy metallic resonator CVG // Proc. of XV International Conference on Integrated Navigation Systems (26-28 May 2008. St-Petersburg). – St-Petersburg: “Electropribor”. 2008. – P. 28–31.
4. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. – 125 с.
5. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В., Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором/ Под редакцией В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. –189 с.
6. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов : учебник для вузов / Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. ; ГИЦ РФ ОАО Концерн "Электроприбор". – СПб., 2015. – 315 с.
7. Волчихин И.А., Волчихин А.И., Малютин Д.М., Матвеев В.В., Распопов В.Я., Телухин С.В., Шведов А.П. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // Известия ТулГУ. Технические науки.2017. Выпуск 9, ч. 2. – С. 59–79.
8. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках.Тула : Издательство ТулГУ,2017. – 225 с.