

УДК 531.746

## **ПРЕЦИЗИОННАЯ ГИРОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОДЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ. ОСНОВНЫЕ СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ**

**Ю.М. Гордеев, Т.В. Падерина, Д.А. Соколов**

Приводятся основные схемно-конструктивные решения, полученные при проектировании компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации, предназначенной для работы на шельфах арктических морей. Система реализует принципиально новую кинематическую схему бесплатформенного гироинклинометра, обеспечивающую требуемую точность позиционирования скважин в высоких широтах.

**Ключевые слова:** система подземной навигации, бесплатформенный гироинклинометр, шельфы арктических морей.

### **Введение**

Исследования российских геологов доказывают, что акватория Северного Ледовитого океана может стать крупнейшей нефтегазоносной провинцией на Земле. Однако насколько богат этот «арктический Клондайк», настолько и труден в освоении. Уникальность этих месторождений обусловлена, прежде всего, необходимостью строительства скважин в шельфовой зоне морей, имеющей сотни метров глубины, находящейся под воздействием чрезвычайно суровых природно-климатических условий. На сегодняшний день в мировой практике не существует аналогов работ, связанных с проектированием и разработкой подобных месторождений.

Строительство скважин арктического шельфа, как правило, с большими отклонениями ствола от вертикали, практически сложно осуществить без применения гироскопической системы подземной навигации, работающей в процессе бурения (так называемой gMWD-системы). Специфика режима точечного компасирования в такой системе обуславливает снижение ее точности в высоких широтах. Это означает, что на широтах 74–78° с.ш. (местоположение наиболее крупных месторождений углеводородов) погрешность вычисления азимута скважины gMWD-системой при условии применения гироскопа с одним и тем же уровнем ухода вырастет в 1,8–2,4 раза по сравнению с аналогичной погрешностью на широте 60° с.ш. [1].

Для обеспечения подземной навигации в упомянутых широтах требуется разработка прецизионной гироскопической системы нового типа. И решение для создания такой системы есть. Это применение так называемой диаметральной схемы, предложенной некоторое время назад учеными ЦНИИ «Электроприбор» в процессе разработки серии универсальных гироскопических инклинометров (ГИ) для работы в скважинах с малым диаметром и произвольной ориентацией. Диаметральная схема представляется наиболее совершенной в ряду технических решений для бесплатформенных ГИ. Она предусматривает разворот корпуса гироскопа вокруг поперечной оси скважинного прибора (СП), при котором вектор кинетического момента остается перпендикулярным оси разворота и находится в диаметральной плоскости

СП. Эта схема позволяет создать на основе одного двухосного датчика угловой скорости (ДУС) новую гироскопическую систему подземной навигации, обладающую рядом характеристик, особо востребованных в высоких широтах, – адаптивностью к траектории, т.е. способностью измерения азимута с одной и той же точностью в любых произвольно ориентированных скважинах, и возможностью осуществления режима инвариантного компасирования, с помощью которого достигается независимость ошибок определения азимута от пусковых погрешностей гироскопа.

Таким образом, при использовании данной схемы в гироскопической системе подземной навигации можно достичь требуемой точности позиционирования скважин даже в высоких широтах.

Однако техническая реализация gMWD-системы, предназначенной для условий морских месторождений Арктики, чрезвычайно сложна. Необходимы продуманные проектные решения.

В работе описывается алгоритм инвариантного компасирования в диаметральной кинематической схеме, приводятся и анализируются основные схемно-конструктивные решения, полученные при проектировании компоновки модуля ориентации (МО) названной системы подземной навигации.

### Режим инвариантного компасирования в диаметральной схеме

На рис. 1 приведена диаметральной кинематическая схема построения гироскопической системы подземной навигации и показаны следующие углы разворота ДУС:  $\psi$  – угол разворота корпуса ДУС вокруг продольной оси СП;  $\chi$  – угол разворота вектора кинетического момента ДУС вокруг поперечной оси СП.

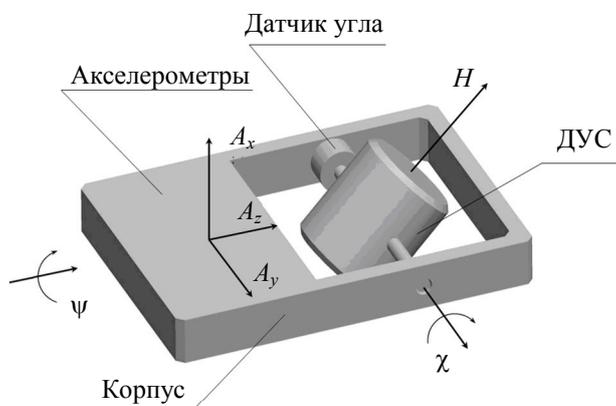


Рис. 1. Диаметральная кинематическая схема построения гироскопической системы подземной навигации

В работах [2, 3], где исследовалось наличие в диаметральной схеме возможности инвариантного компасирования, доказывалось, что для достижения одинаковой эффективности (равной точности) такого компасирования в произвольно ориентированных скважинах требуется управление углами  $\psi$  и  $\chi$ . При этом отмечалось, что при проведении измерений в любой точке ствола достаточно установки корпуса ДУС только в двух положениях: в первом положении  $\psi = 0^\circ, \chi = -\theta$  (где  $\theta$  – зенитный угол ствола), а во втором –  $\psi = 180^\circ, \chi = \theta$ .

При использовании этих положений составляющие дрейфа, пропорциональные проекциям ускорения – осевой дебаланс ротора ДУС и квадратурные составляющие скорости ухода, являющиеся для механического носителя вектора кинетического момента основными возмущающими факторами, не оказывают влияния на точность компасирования. Влияние же составляющих корпусного ухода ДУС, обусловленных взаимодействием вращающегося ротора с неподвижными частями корпуса гироскопа, исключается при вычислении тригонометрических функций угла азимута:

$$\sin A = \frac{\omega_{Y2Г} - \omega_{Y1Г}}{2\Omega \cos \varphi}, \quad \cos A = \frac{\omega_{X1Г} - \omega_{X2Г}}{2\Omega \cos \varphi},$$

где  $A$  – азимут скважины;  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  – широта места;  $\omega_{X1Г}, \omega_{Y1Г}, \omega_{X2Г}, \omega_{Y2Г}$  – выходные сигналы осей чувствительности  $X$  и  $Y$  ДУС, измеренные соответственно в первом и втором положениях.

Как показывают предварительные оценки, при реализации инвариантного компасирования в системе подземной навигации с ДУС типа динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) погрешность определения азимута на высоких широтах не превысит  $\pm 1^\circ$ .

Таким образом, диаметральной схема построения системы подземной навигации позволяет обеспечить высокую точность определения азимута на любых широтах. Здесь уместно отметить, что ни в одной современной gMWD-системе мировых сервисных компаний (например, таких, как Baker Hughes Inteq (США), Scientific Drilling (США)) такая задача не решается.

### Проектирование компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации

Не вызывает сомнения утверждение, что для освоения углеводородных месторождений как на суше, так и на море должно использоваться такое оборудование, которое обеспечивало бы безопасное и рентабельное проведение работ в целом. Однако освоение морских месторождений отличается значительно большей сложностью, а цена ошибок в условиях арктических морей еще выше, чем в теплых [4]. Проектирование сложных технических средств для условий Арктики, в частности, вышеназванной гироскопической системы подземной навигации, невозможно без предварительных прочностных, температурных и других расчетов ее ответственных элементов.

Ниже приводятся результаты предварительных расчетов конструкции компоновки МО рассматриваемой системы, полученные при использовании расчетных методов проектирования, в частности, модулей инженерного анализа SolidWorks Simulation и Pro/ENGINEER Mechanica, а также систем автоматизированного проектирования КОМПАС-3D V10 и SolidWorks 2009.

**Конструкция.** При конструировании gMWD-системы и ее модулей разработчики, прежде всего, сталкиваются со следующими основными проблемами: выбор технических решений по обеспечению требуемых габаритов системы; выбор максимально возможной степени защиты всех узлов системы от воздействия ударов и вибраций; выбор конструкции, комплектующих и элементной базы, обеспечивающих надежную работу в условиях повышенных температур и давлений.

В самом начале разработки конструкции МО рассматриваемой системы предполагалось использовать те же самые конструктивные решения, которые были приняты несколько лет тому назад в ЦНИИ «Электроприбор» при создании МО универсальной забойной телеметрической системы УЗТС–90, предназначенной, в основном, для измерений при проводке боковых стволов в скважинах старого фонда. МО УЗТС–90 с продольной компоновкой имел следующие габаритные размеры: внутренний диаметр – 38 мм, наружный – 44,5 мм. Однако проведенные прочностные расчеты для реализации в указанных габаритах диаметральной кинематической схемы и используемого типа ДНГ дали неудовлетворительный результат. Тогда было принято решение несколько увеличить габаритные размеры проектируемого МО (внутренний диаметр – 40 мм, наружный – 48 мм) с тем, чтобы рассматриваемая система подземной навигации могла быть встроена в компоновку низа буровой колонны (КНБК) с наружным диаметром не менее 114 мм. Применение такой КНБК хорошо согласуется с мнением ряда ученых, которые считают целесообразным при бурении арктических скважин увеличивать диаметры долота и соответственно диаметры бурильной колонны в целях снижения вероятности затяжек и прихватов инструмента [5].

На рис. 2 приведен вариант конструктивной компоновки МО гироскопической системы подземной навигации для КНБК с наружным диаметром 114 мм, а на рис. 3 показана модель сборки блока чувствительных элементов (БЧЭ) МО и узлов его разворотов.



Рис. 2. Трехмерная модель конструктивной компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации

Дадим следующие пояснения к введенным на рис. 3 обозначениям. Приведение в движение установленного на подшипниках качения 5 вращающегося вала с БЧЭ 7 осуществляется с помощью электродвигателя с редуктором 2 и зубчатого колеса 3 внутреннего зацепления, установленного непосредственно на вращающемся валу. Фиксация блока производится с помощью арретирующего устройства 6 на основе

электромагнита. Угол продольного разворота БЧЭ считывается с кодового диска с помощью блока фототранзисторов датчика углового положения 4. Для обеспечения вращения гироскопа 11, находящегося в БЧЭ, применяется малогабаритный электромотор с редуктором 8. Для передачи вращающего момента на корпус гироскопа используются коническая и цилиндрическая пары зубчатых колес 10. Непосредственно на корпусе ДУС установлено колесо специальной формы, чтобы вписать гироскоп в цилиндрический корпус 12. В качестве датчика углового положения ДУС используется абсолютный оптический энкодер 9. Управление работой элементов БЧЭ и приводами разворотов на углы  $\psi$  и  $\chi$  осуществляется контроллером, установленным на плате блока управления 1.

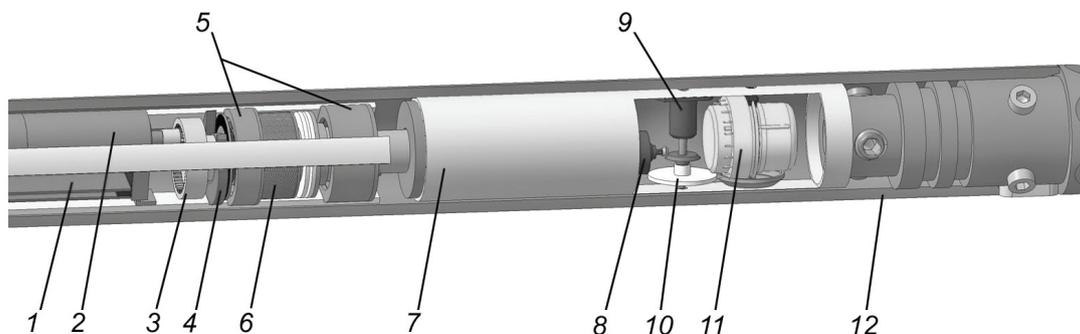


Рис. 3. Узлы разворотов блока чувствительных элементов модуля ориентации на углы  $\psi$  и  $\chi$

**Расчет собственных частот механических колебаний конструкции модуля ориентации.** Одной из важнейших проблем при конструировании модулей gMWD-системы является их защита от перегрузок, возникающих от вибраций и ударов при бурении. В соответствии с требованиями [5], а также с требованиями обеспечения условий эксплуатации MWD-систем (Measurements While Drilling) (например, MWD-системы английской фирмы «Geolink»), уровень вибрации при бурении может достигать 20–30 g при частотах от 30 Гц до 300 Гц [5].

Расчет собственных частот конструкции МО производится с целью выявления того, насколько данные частоты отстоят от диапазона частот вибрации. Результат проведенного модального анализа, показавшего, что собственные частоты проектируемой конструкции МО лежат вне заданного диапазона частот вибрации, приведен в таблице.

№ моды	Частота, Гц
1	564,1
2	634,8
3	1796,4

Таблица. Собственные частоты механических колебаний конструкции МО

**Предварительный прочностной расчет конструкции модуля ориентации.** Проведенные в условиях испытательного центра ЦНИИ «Электроприбор» испытания ДНГ показали, что гироскоп выдерживает максимальную ударную нагрузку в 400 g продолжительностью 3–5 мс. По этой причине при проведении прочностного расчета конструкции МО авторы посчитали наиболее целесообразным рассмотреть воздействие такого же удара. Что касается требований упомянутого выше стандарта [6], то в нем приведены ударные нагрузки, значения которых значительно ниже. Для исследования реакции на удар была создана упрощенная модель конструкции МО, позволяющая сгенерировать сетку конечных элементов, оптимально использующую имеющиеся вычислительные ресурсы. В то же время данная модель дает возможность исследовать именно критические с точки зрения ударных воздействий части компоновки.

Результаты проведенного расчета показали, что исследуемый вариант компоновки МО имеет двукратный запас прочности, вполне достаточный для защиты конструкции от воздействия ударов. На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений в модели конструкции МО в момент удара.

**Исследование температурного режима работы модуля ориентации.** Для проведения исследования вышеназванного режима работы МО необходимо рассмотреть характер изменения температуры в скважинах арктического шельфа.

Прежде всего, такие скважины характеризуются наличием многолетнемерзлых пород (ММП) и субмаринной криолитозоны. По общим закономерностям распределения отрицательных температур придонного слоя допускается возможность распространения мерзлых пород под дном арктических морей приблизительно до глубины 400–600 м, температура пород в этом слое меняется в пределах от  $-8^{\circ}\text{C}$  до  $-$

5°C. Вместе с тем, некоторые исследователи считают [7], что существует вторая и даже третья зона ММП, поэтому можно предположить, что ММП залегают под дном морей до глубины примерно 1500 м, температура глубоко расположенных мерзлых пород находится в пределах от – 6°C до – 1°C. Поскольку сплошность криолитозоны является прерывистой, температура на участках скважин глубиной более 500 м уже может иметь положительные значения, которые начинаются с температуры около +10°C на глубине 500 м и становятся равными примерно +80°C на глубине 3000 м.

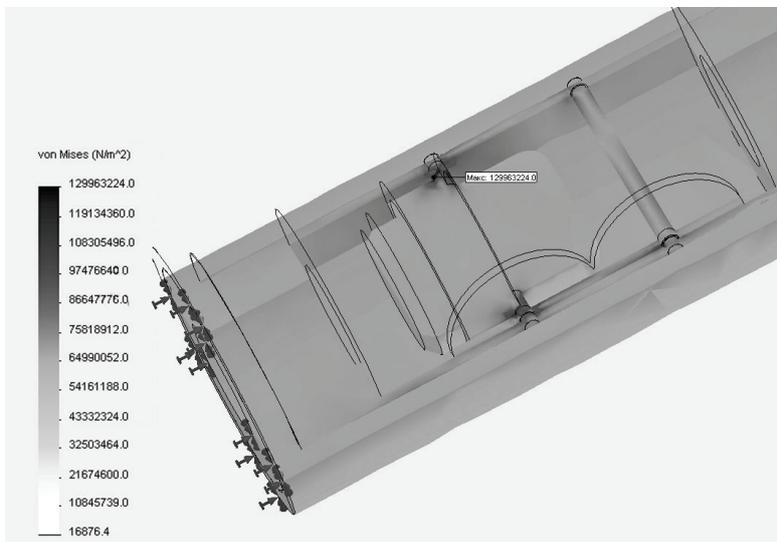


Рис. 4. Динамический анализ ударной нагрузки. Распределение эквивалентных напряжений в модели в момент удара

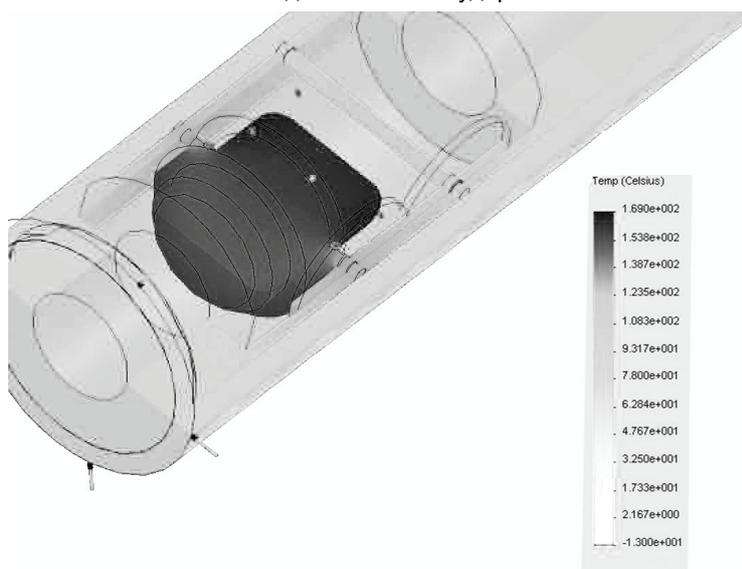


Рис. 5. Анализ стационарной теплопередачи для оценки воздействия на модель постоянной тепловой нагрузки. Распределение температур в модели

Собственно исследование температурного режима МО должно ответить на следующие вопросы: может ли работать в условиях арктических скважин применяемая в ДНГ система термостабилизации, возникают ли температурные градиенты в МО и как они влияют на точность выработки угловых параметров скважины.

Результаты температурного расчета, приведенные на рис. 5, позволяют сделать вывод о том, что мощности штатного обогревателя, установленного на корпусе ДНГ, вполне достаточно для обеспечения работоспособности системы термостабилизации для поддержания температуры гироскопа на уровне +80°C в условиях арктических скважин. По картине распределения температур в модели тепловой нагрузки МО (рис. 5) можно также предварительно оценить уровень температурных градиентов в пределах корпуса гироскопа. Однако, несмотря на достаточно малые перепады температур (единицы градусов), зависимость точности выработки азимута от величин температурных градиентов нуждается в дальнейших исследованиях.

### Заключение

Изложен современный подход к проектированию компоновки модуля ориентации gMWD-системы для проводки скважин на шельфовых месторождениях Арктики. Модуль ориентации реализует диаметрально противоположную схему построения гироскопической системы подземной навигации, обеспечивающую требуемую точность ориентации скважин в высоких широтах. В рамках дальнейших исследований предполагается более детальная проработка узлов разворота датчика угловой скорости и анализ влияния температурных градиентов модуля ориентации на точность выработки угловых параметров скважины. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 11-08-00476).

### Литература

1. Лочехин А.В., Емельянец Г.И. Начальная выставка и калибровка бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 62–69.
2. Биндер Я.И. Универсальный гироскоп с ориентацией главной оси двухосного датчика угловой скорости в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 4. – С. 23–31.
3. Биндер Я.И., Соколов Д.А. Управление разворотом корпуса скважинного прибора в инклинометрах с ориентацией главной оси гироскопа в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 2. – С. 84–87.
4. Papusha A.N., Fedorov I.V., Shtrasser V.V. Symbolic evaluation of boundary problem for offshore design technology // The Mathematica Journal. – 2008. – V. 11. – № 3. – P. 107–128.
5. Оганов Г., Обухов С., Гряколов А., Позднышев С., Хоштария В., Гимаева Ж., Агазаде А. Первый отечественный опыт проектирования строительства скважин с большим отклонением ствола от вертикали на арктическом шельфе // Технология ТЭК. – № 4 (23). – С. 42–48.
6. ГОСТ 26116-84. Аппаратура геофизическая скважинная. – Введ. 01.01.1986. – М.: Госстандарт, 1986. – 48 с.
7. Козлов С.А. Инженерная геология Западно-Арктического шельфа России // Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология. – СПб: ВНИИОкеангеология, 2004. – Т. 206. – С. 139–147.

**Гордеев Юрий Михайлович** – ОАО «Электромеханика», младший научный сотрудник, 133880@gmail.com

**Падерина Татьяна Владимировна** – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, paderinata@rambler.ru

**Соколов Дмитрий Александрович** – ОАО «Электромеханика», старший научный сотрудник, d.a.sokolov@mail.ru