

Адаптивный к траектории скважины универсальный гиросинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости

Я. И. Биндер, И. А. Хазов ✉

АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации",
Санкт-Петербург, Россия

✉ IvanHazov@okb3d.com

Аннотация

Введение. Развивается подход к построению гироскопического инклинометра (ГИ) на основе одного одноосного датчика угловой скорости (ДУС). Констатируется, что такой ГИ следует считать модификацией продольной схемы, сохраняющей известный недостаток тактико-технических характеристик – отсутствие адаптивности к траектории, т. е. соизмеримости погрешностей ГИ при различных зенитных углах. Следующий значимый шаг в развитии схемы с одним ДУС является задачей настоящей работы – это кратное повышение точности измерения азимута для вертикальных и "прилегающих к вертикали" скважин при работе ГИ в непрерывном режиме.

Цель работы. Придание ГИ на базе одноосного ДУС свойства адаптивности к траектории скважины: конструктивная модификация, сравнительный анализ ошибок.

Материалы и методы. Алгоритмы идеальной работы новой схемы в непрерывном режиме синтезируются на основе матричных преобразований координат и уравнений Эйлера. При анализе свойств ошибок ориентации используются методы линеаризации, интегральное исчисление, основы вариационного исчисления и теория линейных дифференциальных уравнений.

Результаты. Придание модифицированной схеме ГИ свойства адаптивности к траектории достигнуто за счет предусмотренного в конструкции отклонения положения оси чувствительности ДУС на некоторый угол неортогональности к продольной оси ГИ. При проектировании ГИ на базе развитого подхода удается реализовать значение этого угла 20° , что обеспечивает эффективный уровень адаптивности к траектории ствола в непрерывном режиме, а увеличение погрешности компасирования не выходит за рамки неопределенности статистических характеристик дрейфа ДУС.

Заключение. Разработанная схема ГИ позволяет в несколько раз снизить влияние дрейфа ДУС на точность выработки азимута в зоне переходных зенитных углов (от "вертикальных" стволов к наклонно направленным) по сравнению с известной точностью для "продольной" схемы, сохраняя тем самым в процессе движения в скважине повышенную точность начальной выставки в ее устье.

Ключевые слова: гиросинклинометр, модификация продольной схемы, классификация скважин, одноосный индикаторный гиросtabilизатор, одноосный ДУС, неортогональное положение, измерительная ось

Для цитирования: Биндер Я. И., Хазов И. А. Адаптивный к траектории скважины универсальный гиросинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 91–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-91-107

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 31.03.2024; принята к публикации после рецензирования 16.05.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor

Yakov I. Binder, Ivan A. Khazov ✉

"Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

Abstract

Introduction. An approach to designing a gyroscopic inclinometer (GI) based on a single uniaxial angular rate sensor (ARS) is developed. It is argued that such an ARS should be considered a modification of a longitudinal GI scheme, preserving the well-known disadvantages of its performance characteristics. The latter include a lack of adaptability to the trajectory, i.e., commensurability of GI errors at different zenith angles. This work sets out to develop a scheme with one ARS in order to achieve a multiple increase in the accuracy of azimuth measurements for vertical and adjacent-to-the-vertical boreholes when the GI is operated in continuous mode.

Aim. To make a GI based on a uniaxial angular velocity sensor more adaptive to the borehole trajectory through its design modification and a comparative analysis of errors.

Materials and methods. Algorithms for ideal operation of the proposed scheme in continuous mode are synthesized based on matrix transformations of coordinates and Euler equations. The properties of orientation errors are examined using linearization methods, integral calculus, fundamentals of the calculus of variations, and the theory of linear differential equations.

Results. The adaptivity of the modified GI scheme to the borehole trajectory was achieved by means of a structurally provided deviation of the ARS sensitivity axis by a certain angle of non-orthogonality to the GI longitudinal axis. When designing a GI based on the developed approach, it is possible to realize the value of this angle of 20°. For this angle, the increase in the compassing error does not exceed the uncertainty of the ARS drift statistical characteristics, while achieving an effective level of adaptivity to the borehole trajectory in continuous mode.

Conclusion. The developed scheme makes it possible to significantly reduce the influence of the ARS drift on the accuracy of azimuth calculation in the transitional zenith angles area (from vertical to directional boreholes) in comparison with the well-known longitudinal scheme, thereby maintaining an increased initial azimuth accuracy during movement in the initial alignment at the wellhead.

Keywords: gyro inclinometer, longitudinal scheme modification, borehole classification, uniaxial gyrostabilizer, uniaxial ARS, non-orthogonal position, measuring axis

For citation: Binder Ya. I., Khazov I. A. A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 91–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-91-107

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 31.03.2024; accepted 16.05.2024; published online 29.11.2024

Введение. Настоящая статья является продолжением и развитием работы [1], в которой была предложена принципиальная новация, позволяющая, по сути, реализовать "продольную" (ХУ) схему [2–4] универсального гироскопического инклинометра (ГИ) на одном одноосном датчике угловой скорости (ДУС), одновременно (и существенно) повышая ее надежность и снижая стоимость.

Под схемой ХУ (продольной) понимается кинематическая схема ГИ, в которой измерительные оси двухосного (двух одноосных) ДУС расположены перпендикулярно продольной оси прибора (вектор кинетического момента гироскопа, при его наличии, направлен вдоль продольной оси ГИ).

Отличительные признаки предложенного в [1] устройства:

– в режиме гирокомпасирования (ГК) одно-временные измерения ортогональных проекций горизонтальной составляющей скорости суточного вращения Земли ДУС заменены последовательными, проводимыми единственным одноосным датчиком, как и ранее установленным на поворотной относительно продольной оси скважинного прибора (СП) рамке, при ее положениях, кратных 90° ;

– в режиме непрерывной съемки введен режим грубой стабилизации оси чувствительности ДУС около апсидальной плоскости с помощью привода подвижной рамки, ранее использовавшейся только для обеспечения ГК, по информации установленных на ней акселерометров и/или датчика угла поворота.

Как отмечено в [1], основным фактором, определившим целесообразность реализации предложенной схемы ГИ, является появление на рынке обладающих высокой стабильностью одноосных кольцевых вибрационных гироскопов (КВГ) с резонатором индукционного типа, выполненным в соответствии с MEMS-технологией. За счет указанного исполнения такие гироскопы обладают перегрузочной способностью, характерной для твердотельных чувствительных элементов (ЧЭ). Эти качества сделали возможной реальную универсализацию применения предложенного технического решения, в том числе, как описано в [1], пригодность такого ГИ для проведения операций по зарезке боковых стволов (бурению одного или нескольких боковых стволов из ранее пробуренного вертикального).

Также необходимо отметить, что кроме продольного (ХУ) возможно исполнение ГИ, в котором измерительная ось ДУС (или одна из осей) направлена вдоль продольной оси инклинометра (может быть реализована как на отдельной гиростабилизированной платформе, так и в бесплатформенном варианте, когда ДУС жестко связан с корпусом ГИ) – так называемая схема Z, более подробно рассмотренная далее.

Цель работы. В [1] отмечено, что у предложенного ГИ сохраняется зависимость точности съемки от траектории скважины, свойственная приборам, построенным по продольной схеме. В частности, на участках ствола, близких к вертикали, определение азимуталь-

ной ориентации ГИ в непрерывном режиме неустойчиво независимо от принятой системы координат [2]. Реализованные ранее группой специалистов во главе с одним из авторов настоящей статьи методические и конструктивные решения [2, 3], опирающиеся на использование дополнительного грубого z-MEMS-гироскопа, позволили уменьшить эту зависимость, но полностью ее не устранили.

Настоящая статья посвящена, как и было анонсировано в [1], дальнейшей трансформации предложенного там технического решения с целью достижения адаптивности процесса съемки скважины к ее траектории, т. е. соизмеримости погрешностей ГИ при различных зенитных углах, и, прежде всего, обеспечения устойчивости определения азимутальной ориентации ГИ на вертикальных участках скважин за счет придания ему некоторых качеств, свойственных схеме Z.

Съемка стволов произвольной ориентации. Этой теме уделено достаточное внимание в работе [2], основные положения которой до сих пор не потеряли актуальности. В то же время, приобретенный опыт и практические результаты изучения вопроса, вынесенного в подзаголовок, оправдывают и несколько иной ракурс его изложения.

Выходными параметрами непрерывного ГИ являются декартовы координаты r_E , r_N , r_h точек траектории скважины в географической системе координат ENh (рис.1, a , b , ось E направлена на восток, N – на север, h – по вертикали места, точка O расположена в устье скважины), рассчитываемые классическим методом навигационного счисления, при котором приращения показаний одометра (длины геофизического кабеля, троса и т. д.) раскладываются по осям навигационного базиса и затем последовательно суммируются (интегрируются). Для этого ГИ вырабатывает матрицу C_h^O направляющих косинусов, характеризующих ориентацию системы координат xyz , связанной со скважинным прибором, относительно географической системы:

$$C_h^O = \begin{bmatrix} x & y & z \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{matrix} E \\ N \\ h \end{matrix} \quad (1)$$

На основании элементов матрицы (1) и информации о приращении длины кабеля L в непрерывном ГИ вычисляются искомые координаты траектории скважины:

$$r_E = \int_0^L c_{13} dl; \quad r_N = \int_0^L c_{23} dl; \quad r_h = \int_0^L c_{33} dl. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2), оперирующие направляющими косинусами, имеют универсальный характер. Тем не менее, на рис. 1, *а* дана их кинематическая интерпретация в классических углах Эйлера [5], традиционно используемых в инклинометрии: A – угол азимута (угол между плоскостью географического меридиана в точке измерения и апсидальной плоскостью, проходящей через оси Oz и Oh); θ – зенитный угол (угол между осями Oz и h); ψ – угол отклонителя (угол между главной полуплоскостью инклинометра, проходящей через оси Oz и Oy , и апсидальной плоскостью). На рис. 1, *б* кинематическая интерпретация дана в углах μ , ν и Φ , введенных ранее в [2, 4] для описания вертикальных скважин (из-за вырождения угла азимута при малых зенитных углах) (угол μ соответствует повороту ГИ в плоскости меридиана, угол ν – повороту в плоскости, перпендикулярной плоскости меридиана, угол Φ – повороту вокруг собственной оси). Связано это с использованием измерителя ускорений (ИУ) в качестве маятни-

кового угломера. Возможность использования ИУ в таком режиме (см., например, [2]) обусловлена, прежде всего, жестким ограничением линейных перемещений корпуса прибора в плоскости поперечного сечения скважины.

Такой подход является важнейшим системообразующим фактором скважинной навигации, уводящим ее от неоправданного использования в инклинометрии алгоритмов инерциальных навигационных систем, оперирующих понятием кажущегося ускорения. Это позволяет оптимизировать состав используемых ЧЭ за счет частичной замены сложных и дорогостоящих ДУС на гораздо более доступные во всех отношениях акселерометры. Однако именно такое замещение порождает зависимость эффективности решения задачи от ориентации ствола скважины, так как по мере его приближения к вертикали свойства маятникового угломера вырождаются (ИУ не чувствителен к азимутальным разворотам).

Возвращаясь к (1), варьируем ее для определенности в углах Эйлера (рис.1, *а*) и вычислим модуль вектора ошибки ориентации, соответствующий градиенту суммарного промаха в определении местоположения точки траектории вдоль оси скважины:

$$\Delta c_0 = \sqrt{\Delta c_{13}^2 + \Delta c_{23}^2 + \Delta c_{33}^2} = \sqrt{(\Delta A \sin \theta)^2 + \Delta \theta^2}. \quad (3)$$

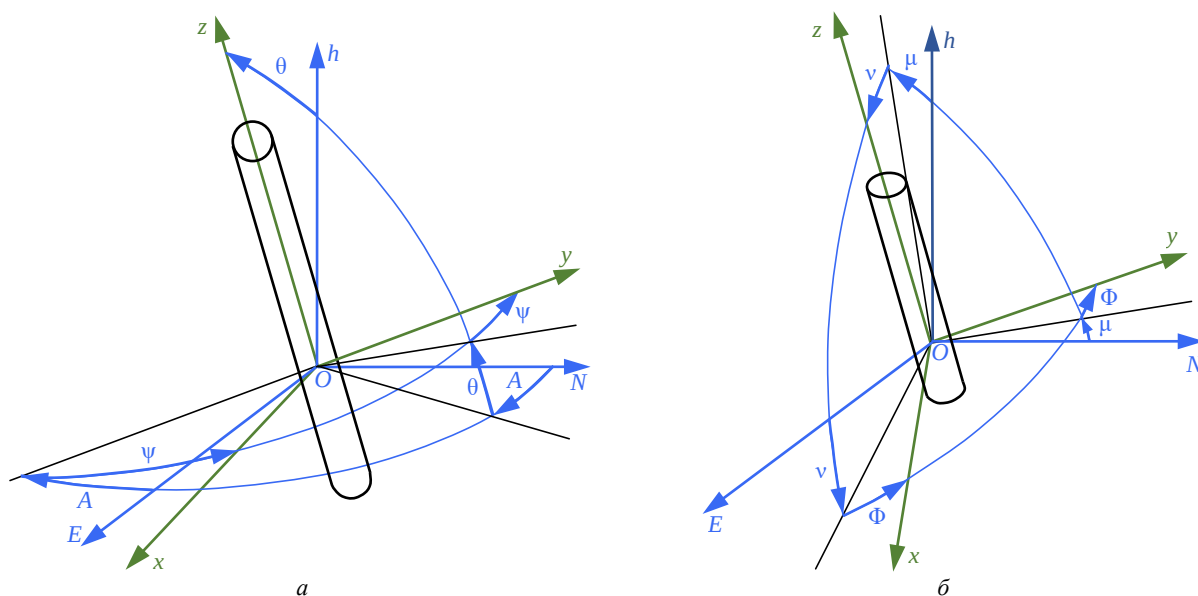


Рис. 1. Ориентация географической (ENh) и связанной с корпусом СП (xyz) систем координат: *а* – в углах Эйлера; *б* – для съемки вертикальных скважин

Fig 1. Orientation of geographic (ENh) and associated with the inclinometer (xyz) coordinate systems: *а* – in Euler angles; *б* – for vertical borehole surveying

При всем многообразии видов траекторий скважин, встречающихся на практике, их типизация с точки зрения инклинометрической съемки вполне исчерпывающая.

Согласно принятой в нефтегазовой отрасли классификации [6–9]:

- к вертикальным относят скважины, угол отклонения ствола которых от вертикали не превышает 5°;

- к наклонно направленным относят скважины, угол отклонения которых от вертикали больше 5...6°;

- горизонтальная скважина – это скважина, интервал вскрытия которой в 2 и более раза превышает толщину пласта.

Приведенные определения следует иметь в виду, чтобы не утратить связь между буровой практикой и гироинклинометрической съемкой.

В настоящей статье в интересах гироинклинометрической съемки скважины будут классифицированы следующим образом:

- тип I (строго вертикальные, рис. 2, а);
- тип S (наклонно-вертикальные, рис. 2, б);
- тип L (наклонно-горизонтальные, рис. 2, в).

Для строго вертикальных скважин (тип I) $r_h \gg \sqrt{r_E^2 + r_N^2}$. Это быстро развивающийся в нынешнем веке тип скважин, необходимых при замораживании горных пород [10–13] в целях создания, в частности, подземных хранилищ. Бурение таких скважин сопровождается, как правило, использованием для измерений в процессе бурения (measurement while drilling – MWD) магнитных или – в особо ответственных случаях – гироскопических инклинометров,

важной, но все-таки вспомогательной функцией которых является определение азимутального направления отклонения точек ствола от вертикали. Оно необходимо для эффективного устранения этого отклонения θ (проектное значение зенитного угла при бурении таких скважин 0°), точное измерение которого становится основной функцией инклинометрии. На практике при разбуривании I-скважин в режиме MWD значения θ и погрешности его измерений соизмеримы. При этом погрешность, для всех применяемых на практике ГИ формируемая погрешностями ИУ, определяет значение Δc_0 . В таком случае для I-скважин описывать размер пространственного промаха удобнее с использованием углов μ и ν (рис. 1, б):

$$\Delta c_0 = \sqrt{\Delta \nu^2 + \Delta \mu^2}.$$

Длительность режима MWD, определяемая скоростью проходки достаточно глубоких (до 1 км) скважин, может потребовать использования для азимутальных измерений точечного компасирования, во всяком случае, в качестве базового. Последнее обстоятельство, несмотря на, казалось бы, пониженные требования к точности оценки азимута, определяет необходимость использования ДУС, обеспечивающего ГК (см. аналогичные пояснения для зарезки боковых стволов в [1]).

Для глубоких (1 км и более) скважин других типов в корректно спроектированных системах гироскопической навигации слагаемые под знаком корня в (3) должны (в среднем по траектории) различаться существенно, но уже в пользу первого из них. В настоящее время успехи в со-

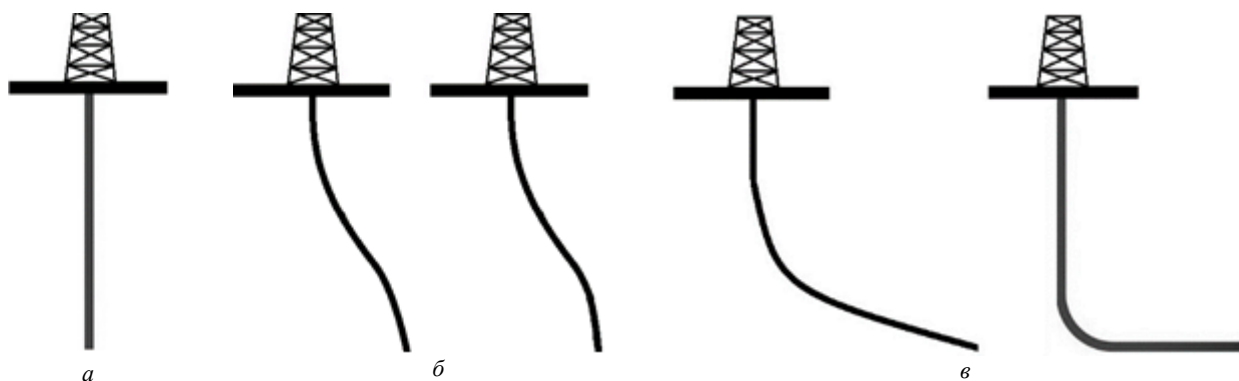


Рис. 2. Варианты профилей скважин: а – строго вертикальная (тип I); б – наклонно-вертикальные (тип S); в – наклонно-горизонтальные (тип L)

Fig. 2. Borehole profiles: а – vertical (type I); б – inclined-vertical (type S); в – slant and horizontal (type L)

здании и широком внедрении доступных MEMS-акселерометров, соответствующих требованиям к системам навигационно-тактического класса, сделали из такой тенденции норму. Именно поэтому параметр бокового промаха

$$\alpha = \Delta A \sin \theta \quad (4)$$

для скважин произвольной ориентации является определяющим, а приближенное значение оценки самого бокового промаха, как нетрудно убедиться, будет иметь вид

$$\Delta_{xy} = v_z \int_0^t \alpha \, dt, \quad (5)$$

где v_z – скорость спуска/подъема ГИ в скважине.

Возможные последовательность и градиенты зенитных углов в пределах одного ствола, в отличие от его азимутального направления, которое может быть любым, определяются не только условиями физической и технической реализуемости. Несмотря на большое разнообразие инженерно-геологических задач, возникающих при строительстве скважин, закономерности изменчивости траекторий их стволов (профиля) вполне подчиняются принципам, положенным в основу введенной на рис. 2 классификации (I, S, L). Однако для использования этой классификации при аналитических оценках, в том числе для сравнительного анализа эффективности съемки, необходимо ввести параметры профилей и соответствующие им количественные критерии.

В качестве такого параметра может быть предложено средневзвешенное значение синуса зенитного угла:

$$\sin \theta_{cp} = \frac{v_z}{L} \int_0^t \sin \theta \, dt. \quad (6)$$

Физический смысл (6) вполне очевиден для тривиальной модели погрешности азимута, определяемой главным образом ее начальным значением ΔA_0 . Имея в виду (4) и (5), получим ожидаемое определение бокового промаха:

$$\Delta_{xy} = \Delta A_0 L \sin \theta_{cp}. \quad (7)$$

В режиме так называемой точно-непрерывной съемки [14] ошибка построения траектории определяется погрешностью точечного ГК, а

допустимые интервалы между остановками – погрешностями гироазимутального режима. При этом получаемые по (7) точные значения заменяются среднеквадратическими отклонениями (СКО), полученными к текущему моменту. В последней оценке необходимо учитывать также искажения, обусловленные зависимостью эффективности ГК от ориентации скважины [15].

Как и любой эмпирический параметр, величина (6) не учитывает всех условий характеризуемой процедуры. Так, в нем не учитывается, что вместе с ростом θ обычно возрастает значение ΔA и его значимость для контроля бокового промаха при больших зенитных углах (5). Возможны и иные замечания, но, как показывает опыт, по совокупности простоты и наглядности оценки, с одной стороны, и ее эффективности, с другой – критерий (6) можно считать приемлемым.

В практике глубокого (более 1 км) бурения принято считать наклонно направленным ствол с зенитным углом более 6° . При строительстве всех известных авторам разновидностей скважин типа S значительную долю общей наклонной длины L (20 %) занимает номинально вертикальное бурение (например, под кондуктор), после которого обычно начинается набор кривизны с выходом на условно прямолинейный участок (см. рис. 2, б), причем таких участков может быть несколько. Поэтому скважины, выходящие по мере приближения к забою на зенитные углы 45° и более, вполне могут быть отнесены к этой (S) градации при выборе значения $\sin \theta_{cp} = 0.5$. Съемка стволов типа S в современной геофизической практике встречается чаще всего, что обусловлено как огромным фондом скважин, пробуренных еще в XX в. и подлежащих реновации (капитальному ремонту, резке боковых стволов, кустовому разбуриванию [16–18]), так и сравнительной простотой их бурения в современных условиях. Это позволяет вести разработку месторождений не очень крупным добывающим и буровым компаниям, которые не в состоянии освоить технологии строительства горизонтальных скважин.

Наиболее органичной для непрерывной съемки стволов, "прилегающих к вертикали" (в терминологии настоящей статьи, профилей типа S), выглядит измерение ДУС угловой скорости

вокруг оси скважинного прибора (схема Z [2, 19]). Однако критерий "прилегания" при этом не формулировался и не обосновывался. В рамках используемой в настоящей статье инклинометрической классификации его можно конкретизировать, введя, в соответствии с изложенным, условие $\sin \theta_{\text{ср}} = 0.5$. Более детальное рассмотрение критериев предложенной в настоящей статье классификации скважин, используемой в качестве основы для рубрикации материалов исследования, выходит за ее рамки.

Примеры реализации схемы Z крайне малочисленны в силу целого комплекса причин как инженерного, так и принципиального свойства. Дело в том, что угловая скорость вращения по углу отклонителя ψ , которую необходимо измерять в такой схеме, на 3...4 порядка выше, чем определяемые скоростью проведения спуско-подъемных операций v_z и кривизной стволов составляющие угловой скорости по осям x и y . Поэтому для реализации по такой схеме бесплатформенного ГИ нужны уникальные ДУС, сочетающие достаточно высокую точность с указанным широким диапазоном измерения. Некий паллиатив бесплатформенного Z, реализованный в конструктивных рамках продольной схемы (ХУ) УГИ 42.03 [4] в целях обеспечения прохождения вертикальных участков стволов, работоспособен для очень неглубоких и/или "очень вертикальных" участков скважин.

Единственная полноценная разработка ГИ по схеме Z, ИГН73-100/80 [20], реализована на базе гироскопа типа одноосного индикаторного гиросtabilизатора (ОИГС) и в целом успешно эксплуатируется четверть века [19]. В этом изделии благодаря нестандартному техническому решению удалось добиться приемлемой точности ГИ на базе типичного ЧЭ, применявшегося в характерных для технических решений прошлого века системах стабилизации – гироскопа Д7-ОЗИ с внутренним подвесом в виде сферического шарикоподшипника, обеспечивающего как главное вращение, так и две степени свободы подвеса ротора. Схема Z, реализованная на базе ОИГС, позволяет обойти важнейшее ограничение бесплатформенной схемы – большой диапазон измерения угловых скоростей.

Общее понимание принципа ее работы дает рис. 3. В качестве ЧЭ используется двухка-

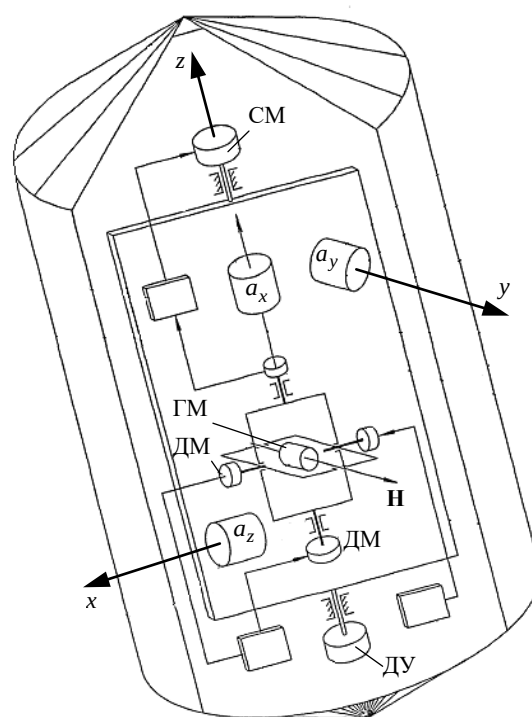


Рис. 3. Схема ОИГС: a_x, a_y, a_z – акселерометры; ГМ – гироскоп; СМ – стабилизирующий мотор; ДУ – датчик угла; ДМ – датчик момента гироскопа; $\mathbf{H}$ – вектор кинетического момента гироскопа

Fig. 3. Uniaxial indicator gyroscopic stabilizer scheme: a_x, a_y, a_z – accelerometers; ГМ – gyromotor; СМ – stabilizing motor; ДУ – angle sensor; ДМ – gyroscope torque sensor; $\mathbf{H}$ – gyroscope angular momentum vector

нальный управляемый гироскоп, по осям которого установлены датчики углов и датчики моментов, а также 3 акселерометра a_x, a_y, a_z . Вектор кинетического момента гироскопа $\mathbf{H}$ ориентирован в плоскости поперечного сечения ГИ. Один канал гироскопа используется в режиме ДУС для начальной азимутальной ориентации платформы, другой – является датчиком системы стабилизации, позволяющей удерживать платформу неподвижной относительно продольной оси СП, а матрица ориентации формируется по показаниям акселерометров.

При разработке упомянутого ГИ по схеме Z были предъявлены и обеспечены очень высокие требования к аппаратной точности стабилизации, обеспечившие допустимый уровень ухода ОИГС относительно оси z . Они были достигнуты во многом за счет схемы, подразумевавшей удержание вектора кинетического момента гироскопа около плоскости горизонта, а в целом – благодаря заимствованию конструк-

тивно-технических решений, традиционных для спецтехники второй половины XX в., весьма сложных, но освоенных за счет серийности, немислимой для рынка собственно ГИ.

К краткому описанию достоинств ИГН73 следует добавить, что сигнал угловой скорости, получаемый от второй измерительной оси трехстепенного гироскопа и не участвующий в формировании ОИГС, использовался в режиме ДУС для проведения точечного компасирования по принципу, аналогичному описанному в [1].

Подытоживая положительные характеристики, подтвержденные не одной сотней этих приборов за четверть века эксплуатации, еще раз подчеркнем, что они были обеспечены во многом уникальным сочетанием оригинального технического решения с конкретными производственно-экономическими условиями большого приборостроительного предприятия. ИГН73 не стал пилотным проектом широкого применения ОИГС для построения ГИ. Он с самого начала отставал от тенденций начинающегося XXI в. к уменьшению диаметра СП и переходу к бурению горизонтальных стволов. В настоящее время ГИ, выполненный по схеме Z с малым диаметром (42.0...44.5 мм), на рынке отсутствует, что отражает еще и общеиндустриальные тенденции: как правило, независимо от конкретного типа гироскопического датчика и количества (1 или 2) осей измерения угловой скорости, последние расположены в поперечном сечении ДУС. Другими словами, ДУС приспособлены в большинстве своем для осевого расположения в составе ГИ.

Достижение адаптивности к траектории для ГИ на единственном одноосном ДУС. Конструктивно-техническое решение, заключающееся в использовании одноосного КВГ вместо двухосного гироскопа (или двух одноосных) и стабилизации рамки в апсидальной плоскости скважины, предложенное в [1], также можно отнести к основанным на осевом расположении вектора кинетического момента ДУС (реального или воображаемого).

Предложенная в настоящей статье новация, схематично представленная на рис. 4, заключается в развороте установленного на подвижной рамке гироскопа на некоторый угол неортогональности χ и направлена на придание ГИ с одним ДУС (в [1] и во введении к настоящей ста-

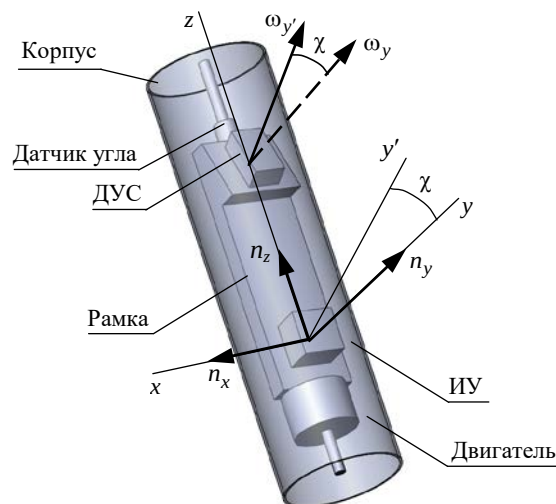


Рис. 4. ГИ с одноосным ДУС

Fig. 4. Gyroscopic inclinometer with a uniaxial angular rate sensor

тье обозначенным как модификация продольной схемы (ХУ)) некоторых качеств, свойственных Z-ОИГС. Поэтому в дальнейшем схема на рис. 4 названа неортогональной.

Для "разгрузки" ДУС при $\chi \neq 0$ от проекции угловой скорости, связанной с "моторным эффектом" кабеля, на котором подвешен СП (вращательным движением, обусловленным упругой деформацией кабеля и изменением его длины в процессе измерений), достаточно косвенной стабилизации подвижной рамки, т. е. ее удержания в положении $\psi \approx 0^\circ$. Стабилизация выполняется на основании информации от стороннего источника, в частности, от акселерометров [1]. При этом погрешность работы ГИ не зависит от строгости соблюдения условия $\psi \approx 0^\circ$, поскольку измеренное значение угла ψ учитывается в алгоритме определения азимута.

Таким образом, далее следует решить две задачи:

- конструктивную: оставаясь в рамках габаритных ограничений, развернуть корпус ДУС;
- расчетно-теоретическую: разработать алгоритм скважинной навигации, соответствующий новой кинематике системы.

Проекции абсолютной угловой скорости на оси x, y, z определяются так:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} \cos \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \sin \psi - \\ &- \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_y &= -\dot{\theta} \sin \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \cos \psi + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\sin A \sin \psi - \cos A \cos \theta \cos \psi); \\ \omega_z &= \dot{\psi} + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \cos \theta - \\ &- \Omega \cos \varphi \cos A \sin \theta.\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь и далее точка над обозначением переменной обозначает скорость ее изменения.

Имея в виду разворот измерительной оси гироскопа на угол χ вокруг оси x (рис. 5, а), можно записать:

$$\omega_{y'} = \omega_y \cos \chi + \omega_z \sin \chi. \quad (9)$$

Подставив соотношения из (8) в (9), имеем:

$$\begin{aligned}\omega_{y'} &= \\ &= \dot{\psi} \sin \chi - \dot{\theta} \sin \psi \cos \chi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \times \\ &\times (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \\ &+ \Omega \cos \varphi [\sin A \sin \psi \cos \chi + \\ &+ \cos A (\cos \theta \cos \psi \cos \chi - \sin \theta \sin \chi)].\end{aligned}\quad (10)$$

Принимая во внимание наличие косвенной стабилизации подвижной рамки около нуля и, вследствие этого, полагая ψ в (10) малым и меняя его обозначение на $\delta\psi$ (ошибку системы стабилизации), можно записать выражение

$$\begin{aligned}\dot{A} \sin(\theta + \chi) &= -\omega_y + \dot{\psi} \sin \chi - \delta\psi \dot{\theta} \cos \chi + \\ &+ \Omega \sin \varphi \sin(\theta + \chi) + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times [\delta\psi \sin A \cos \chi + \cos A \cos(\theta + \chi)].\end{aligned}\quad (11)$$

Ошибка системы стабилизации $\delta\psi$ – малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный "алгоритмической" (заведомым упрощением) или аппаратной "грубостью" системы стабилизации, известный с погрешностью ИУ [1].

Выражение (11) является аналитическим отражением придания ГИ с одним ДУС – модификации продольной схемы (ХУ) – некоторых качеств, свойственных Z-ОИГС. Благодаря изменению положения измерительной оси ДУС относительно корпуса СП он при любой ориентации ствола будет измерять ненулевую – с коэффициентом не менее, чем $\sin \chi$ ($\theta > 0$) – проекцию полезного сигнала $\dot{A}$. При значимых величинах угла ($\chi \geq 20^\circ$) множитель при $\dot{A}$, в отличие от исполнения, описанного в [1], при-

нимает значения от 1/3 до 1 при любых величинах угла θ , что обеспечивает желаемую адаптивность ГИ к траектории скважины в режиме непрерывных измерений.

Этот режим для описываемого построения ГИ подробно исследован далее.

Особую значимость имеет минимизация ошибки выработки азимута на вертикальных участках стволов для скважин типа S и L. Даже если предположить, что погрешность определения азимута ΔA в (4) имеет малое значение в точке с зенитным углом θ_0 , относящейся к близкому к вертикальному участку скважины типа S(L), и не возрастает по мере приближения к забою, она порождает рост бокового промаха α в соотношении $\sin \theta_{cp} / \sin \theta_0$. Он может достигнуть значения 15...30 и более, что подчеркивает особую значимость сохранения при движении в скважине точности начальной выставки ГИ в ее устье, где эта процедура проводится с особой тщательностью и, при необходимости, может обеспечиваться внешним источником курсоуказания, например спутниковым компасом (на двух разнесенных антеннах) или гиротеодолитом. Рассмотренная ситуация – наиболее важная побудительная причина повышенного внимания к азимутальной точности ГИ в вертикальной части ствола.

В связи с этим имеет смысл анализ модифицированной схемы с одним ДУС, развернутым на угол χ , начать с оценки точности компасирования.

Для схемы, описанной в [1], справедливы соотношения:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_x \cos(\varphi - \mu) + \omega_y \sin \nu \sin(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)]}; \\ \cos \Phi &= \frac{-\omega_x \sin \nu \sin(\varphi - \mu) + \omega_y \cos(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)]},\end{aligned}\quad (12)$$

где ω_x , ω_y – угловые скорости, вырабатываемые ДУС в двух отличающихся на 90° относительно продольной оси ГИ положениях рамки.

С учетом малости углов μ , ν выражения (12) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_x}{\Omega \cos \varphi} + \frac{(-\mu \omega_x + \nu \omega_y) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi}; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_y}{\Omega \cos \varphi} - \frac{(\nu \omega_x + \mu \omega_y) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi}.\end{aligned}\quad (13)$$

Для варианта ГИ с ДУС, развернутым на угол χ относительно плоскости поперечного сечения ГИ, выражения, аналогичные (12) и (13), будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_{x'} \cos(\varphi - \mu) + \omega_{y'} \sin \nu \sin(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} - \\ &\quad - \frac{\Omega \sin(\varphi - \mu) \sin \chi}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} \times \\ &\quad \times [\cos(\varphi - \mu) + \sin \nu \sin(\varphi - \mu)]; \\ \cos \Phi &= \frac{-\omega_{x'} \sin \nu \sin(\varphi - \mu) + \omega_{y'} \cos(\varphi - \mu)}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} - \\ &\quad - \frac{\Omega \sin(\varphi - \mu) \sin \chi}{\Omega [\cos^2(\varphi - \mu) + \sin^2 \nu \sin^2(\varphi - \mu)] \cos \chi} \times \\ &\quad \times [\cos(\varphi - \mu) + \sin \nu \sin(\varphi - \mu)]; \\ \sin \Phi &= \frac{\omega_{x'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \frac{(-\mu \omega_{x'} + \nu \omega_{y'}) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \\ &\quad + \frac{\mu \operatorname{tg} \chi}{\cos^2 \varphi} - \nu \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg}^2 \varphi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_{y'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - \frac{(\nu \omega_{x'} + \mu \omega_{y'}) \operatorname{tg} \varphi}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} + \\ &\quad + \frac{\mu \operatorname{tg} \chi}{\cos^2 \varphi} + \nu \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg}^2 \varphi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi,\end{aligned}\quad (14)$$

где $\omega_{x'}$, $\omega_{y'}$ – угловые скорости ДУС, измерительная ось которого развернута на угол χ , вырабатываемые в двух отличающихся на 90° относительно продольной оси ГИ положениях рамки.

В соотношениях (13) слагаемые в скобках определяются множителями μ , ν , что позволяет в выражениях для ω_x , ω_y в этой линейной комбинации (во всяком случае, для широт, представляющих реальный интерес при разведке и добыче полезных ископаемых) ограничиться учетом членов порядка угловой скорости вращения Земли. Заметим, что точный алгоритм идеальной работы ГИ по-прежнему описывается соотношениями (12), не имеющими методических погрешностей, связанных с отклонениями ствола от вертикали, однако с точки зрения простоты и наглядности сравнительного анализа ошибок, (13) и проводимое

далее упрощение оказываются очень удобными:

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_x}{\Omega \cos \varphi} - n_x \operatorname{tg} \varphi; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_y}{\Omega \cos \varphi} - n_y \operatorname{tg} \varphi,\end{aligned}$$

где n_x , n_y – выходные сигналы ИУ.

Рассуждая аналогично, упростим формулы (14):

$$\begin{aligned}\sin \Phi &= \frac{\omega_{x'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - n_x \operatorname{tg} \varphi + \\ &\quad + \mu \operatorname{tg} \chi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi; \\ \cos \Phi &= \frac{\omega_{y'}}{\Omega \cos \varphi \cos \chi} - n_y \operatorname{tg} \varphi + \\ &\quad + \mu \operatorname{tg} \chi - \operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \varphi.\end{aligned}$$

Сравним дисперсии $D_\Phi = \sigma_\Phi^2$ для обеих схем, положив $\sigma_{\omega_x}^2 = \sigma_{\omega_y}^2 = \sigma_{\omega_{x'}}^2 = \sigma_{\omega_{y'}}^2 = \sigma_\omega^2$ и $\sigma_{n_x}^2 = \sigma_{n_y}^2 = \sigma_n^2$. Значения $D_{\Phi 1}$ и $D_{\Phi 2}$ для первой и второй схем соответственно будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned}D_{\Phi 1} &= \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi} + \sigma_n^2 \operatorname{tg}^2 \varphi; \\ D_{\Phi 2} &= \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \chi} + \sigma_n^2 (\operatorname{tg}^2 \chi + \operatorname{tg}^2 \varphi).\end{aligned}\quad (15)$$

Для ЧЭ, используемых (см. ранее) "в корректно спроектированных системах гироскопической навигации", справедливо соотношение $\sigma_\omega^2 / \Omega^2 \gg \sigma_n^2$. Тогда в (15) можно пренебречь вторыми слагаемыми, окончательно упростив их:

$$D_{\Phi 1} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi}; \quad D_{\Phi 2} = \frac{\sigma_\omega^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \chi},$$

и сделать окончательный вывод, что СКО двух схем различает коэффициент $\sec \chi = 1 / \cos \chi$. Это означает, что разворот оси чувствительности единственного ДУС, например, на угол $\chi = 20^\circ$ (конструктивно вполне реализуемый) от плоскости поперечного сечения ГИ приводит к увеличению на 6 % СКО его точечного компасирования вблизи вертикали. Таким образом, за-

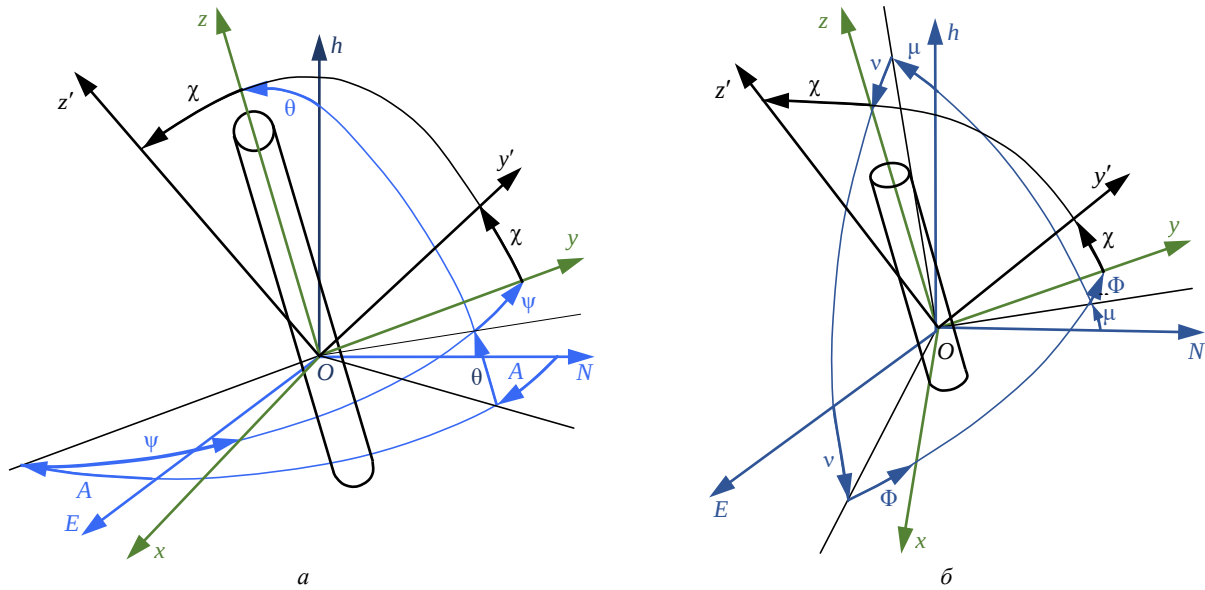


Рис. 5. Поворот на угол χ : а – в углах Эйлера; б – для съемки вертикальных скважин
Fig. 5. Rotation by angle χ : а – in Euler angles; б – for vertical borehole surveying

вершая этот анализ, можно констатировать, что проводимая авторами настоящей статьи конструктивная новация практически (глубоко в рамках допустимой неопределенности статистических характеристик) не влияет на сравнительную эффективность точечного режима ГИ.

Перейдем к анализу сравнительной эффективности использования предложенной схемы в непрерывном режиме. Для начальной фазы траектории ствола целесообразно воспользоваться углами ориентации μ , ν , Φ (рис. 5, б). Далее, проведя преобразования, аналогичные (8)–(10), запишем:

$$\begin{aligned} \omega_{y'} = & \sin \chi [\dot{\Phi} + \dot{\mu} \sin \nu + \Omega \sin(\varphi - \mu) \cos \nu] + \\ & + \cos \chi \{ [\dot{\nu} + \Omega \cos(\varphi - \mu)] \cos \Phi - \\ & - [\dot{\mu} \cos \nu - \Omega \sin \nu \sin(\varphi - \mu) \sin \Phi] \}. \end{aligned} \quad (16)$$

При дальнейшем анализе будем исходить из режима грубой (косвенной) стабилизации с точностью $\delta\Phi$ по углу Φ , определяемому с ошибкой $\Delta\Phi$. Здесь, как и ранее, $\delta\Phi$ – малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный неидеальностью системы стабилизации, известный с погрешностью ЧЭ ($\Delta\Phi$). Варьируя (16), учитывая заведомую малость углов μ , ν и пренебрегая, как и обычно для непрерывного режима, членами, определяемыми угловой скоростью вращения

Земли, получим следующее выражение для ошибки определения угловой скорости $\Delta\dot{\Phi}$:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\Phi} = & \frac{\Delta\omega_{y'}}{\sin \chi} - \Delta\dot{\mu}(\nu - \delta\Phi \operatorname{ctg} \chi) - \\ & - \Delta\nu \operatorname{ctg} \chi - \Delta\nu\dot{\mu} + \Delta\Phi \operatorname{ctg} \chi(\dot{\mu} + \dot{\nu}\delta\Phi). \end{aligned} \quad (17)$$

Схема ГИ с одноосным ДУС [1], бывшая объектом сравнительного анализа эффективности точечного компасирования для вертикальных скважин, в непрерывном режиме их съемки принципиально неработоспособна. В этом режиме для сравнения есть смысл использовать продольную схему с дополнительным микромеханическим гироскопом (ММГ) с измерительной осью, направленной вдоль оси z (так называемую схему XYZ , где малая буква z показывает низкую точность ММГ по сравнению с основным гироскопом), техническим и алгоритмическим решениям которой применительно к вертикальным стволам посвящены, в частности, работы [2, 4]. Алгоритм идеальной работы для этого варианта описан в [4] и, по существу, комплексирует ГИ типа XY и типа z (в котором азимут на вертикальном участке скважины определяется в соответствии с третьей формулой (8)) на базе общего ИУ. В начальной фазе траектории точность такого комплексного ГИ практически всецело будет определяться

погрешностями схемы z . Выражение, аналогичное (17), в данном случае будет иметь вид

$$\Delta\dot{\Phi} = \Delta\omega_z - (\Delta\dot{\mu}v + \Delta v\dot{\mu}). \quad (18)$$

С учетом (18) соотношение дрейфовых составляющих ошибок "продольной" схемы с дополнительным ММГ и с одним ДУС с неортогональной осью чувствительности на "вертикальных" стволах приближенно (с точностью до отказа от интегральных соотношений) определяется величиной $\Delta\omega_z / (\Delta\omega_z \sin \chi)$. Для реально применяющихся ММГ она составляет не менее двух порядков, поэтому есть смысл продолжить сравнительный анализ применительно к иным погрешностям схемы.

Уже на первой секунде движения в скважине легко установить преобладающее влияние интеграла от первого (обусловленного дрейфом) слагаемого в правой части (18) по отношению к взятым в скобки второму и третьему членам, входящим и в правую часть (17). Для продолжения сравнительной оценки точности на вертикальном участке ствола продольной схемы с дополнительным ММГ (XYZ) и неортогональной схемы необходимо сопоставить (18) и (17). Следующим порогом, который преодолевает интеграл от $\Delta\omega_z$, является $\Delta v \operatorname{ctg} \chi$, значение которого определяется погрешностями ИУ. Для этого ММГ потенциально доступных моделей требуется 2...6 с.

Наибольшее влияние на неопределенность результатов сравнительного анализа оказывает начальное значение $\Delta\Phi_0$, порождающее в со-

ответствии с общим решением однородного линейного дифференциального уравнения, соответствующего (17), составляющую $\Delta\Phi_0 \exp[(\mu - \mu_0) \operatorname{ctg} \chi]$ (μ_0 – начальное значение μ), с учетом малости величины $(\mu - \mu_0)$ аппроксимируемую на начальном участке траектории как

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_0 [1 + (\mu - \mu_0) \operatorname{ctg} \chi]. \quad (19)$$

На рис. 6 сопоставляются значения $\Delta\Phi$, определяемые интегралом от $\Delta\omega_z$ (принято значение $\Delta\omega_z = 40^\circ/\text{ч}$) и полученные по (19), при разной интенсивности набора кривизны скважины в начальной фазе ее траектории. Из рис. 6, а и б, соответствующих диапазону естественного отклонения ствола от прямолинейности (т. е. погрешности выдерживания направления буровым инструментом без принятия специальных мер по его стабилизации), следует очевидное преимущество точности неортогональной схемы над XYZ. Если же в начальной фазе траектории уже планируется направленный набор кривизны (рис. 6, в) (ситуация не очень частая, но не исключительная), то обе схемы имеют сходные показатели точности. Следует отметить, что уровень неопределенности статистических характеристик дрейфа ММГ и погрешности начальной выставки ГИ позволяет рассматривать конкретное соотношение значений на рис. 6, в только в качестве примера.

В то же время существенные – показанные на рис. 6, в или близкие к ним – отклонения

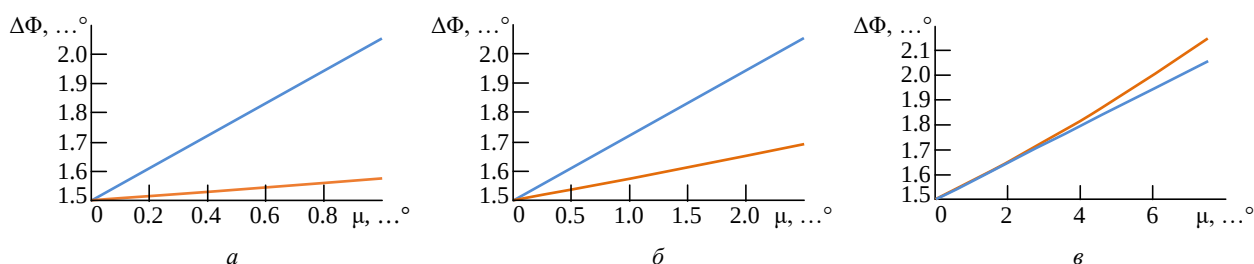


Рис. 6. Погрешность $\Delta\Phi$ в непрерывном режиме для двух схем при ошибке начальной выставки $\Delta\Phi_0$:

а – $\dot{\mu} = 0.02^\circ/\text{с}$; б – $\dot{\mu} = 0.05^\circ/\text{с}$; в – $\dot{\mu} = 0.15^\circ/\text{с}$;

— неортогональная схема ($\chi = 20^\circ$); — продольная схема с использованием ММГ

Fig 6. Error of the $\Delta\Phi$ in continuous mode for two circuits with an initial setting error $\Delta\Phi_0$:

а – $\dot{\mu} = 0.02^\circ/\text{с}$; б – $\dot{\mu} = 0.05^\circ/\text{с}$; в – $\dot{\mu} = 0.15^\circ/\text{с}$;

— non-orthogonal scheme ($\chi = 20^\circ$); — longitudinal diagram using a micromechanical gyroscope

стволов от вертикали позволяют вернуться к анализу в углах Эйлера и управлению рамкой по углу отклонителя (см. (11)), продолжив рассмотрение сравнительной эффективности неортогональной схемы для профиля скважины типа S на протяжении всей ее траектории.

Варьируем (11) для исходной схемы [1] с одним ДУС, т. е. при $\chi = 0$. Опуская, как указывалось ранее, члены, определяемые угловой скоростью вращения Земли, получим выражение

$$\Delta \dot{A} \sin \theta = -\Delta \omega_y - \Delta \dot{\theta} \delta \psi - \Delta \dot{A} \cos \theta, \quad (20)$$

по своему виду соответствующее теоретически и экспериментально подробно исследованным 10...15 лет назад соотношениям для ошибок продольной (ХУ) схемы [2, 4, 19]. Это вполне ожидаемо позволяет прибегнуть к известному выводу [1] о том, что, за исключением специальных профилей, почти не встречающихся по мере удаления стволов от вертикали, превалирующим в формировании ошибки азимута (см. (4)) и приводящим к ее накоплению, является член $\Delta \omega_y / \sin \theta$.

Для предложенной в настоящей статье модификации схемы с одним ДУС с неортогональной осью чувствительности аналогично имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{A} \sin(\theta + \chi) = & -\Delta \omega_y - \Delta \dot{\theta} \delta \psi \cos \chi + \\ & + \Delta \dot{\psi} \sin \chi - \Delta \dot{A} \cos(\theta + \chi). \end{aligned} \quad (21)$$

В отличие от (20), формула (21) получена впервые, но отличается от нее по структуре несущественно: коэффициент $\cos \chi$ близок к 1, а $\cos(\theta + \chi)$ для скважин типа S отличается от $\cos \theta$ не более, чем в 1.5...1.6 раза. Все это, как и появившийся в (21) аддитивный член $\Delta \dot{\psi} \sin \chi$, интегрирование которого тривиально, никак не меняет ожидаемого вывода: превалирующим для формирования в неортогональной схеме ошибки азимута и приводящим к ее накоплению является член $\Delta \omega_y / \sin(\theta + \chi)$.

Таким образом, поскольку основной вклад в погрешность определения азимута в обоих случаях вносит дрейф ДУС, можно сравнить уровень точности схем с помощью соотношения

$$F(\theta) = \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \chi)}. \quad (22)$$

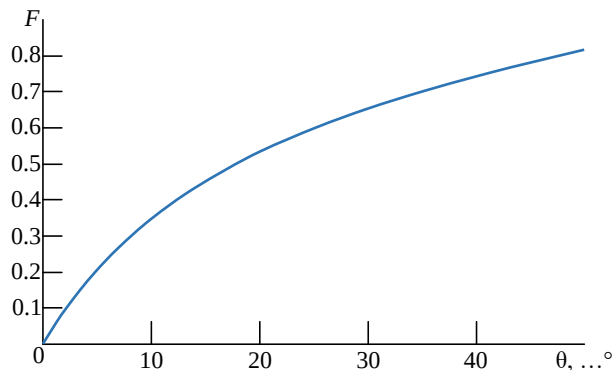


Рис. 7. Точность определения азимута в непрерывном режиме в схеме с $\chi = 20^\circ$ по отношению к схеме с $\chi = 0$ в диапазоне углов отклонителя, характерном для режима "грубой" стабилизации ($\cos \psi \approx 1$)

Fig. 7. Accuracy of azimuth determination in continuous mode in scheme with $\chi = 20^\circ$ relative to scheme with $\chi = 0$ in the range of deflector angles characteristic of a coarse stabilization mode ($\cos \psi \approx 1$)

На рис. 7 представлена зависимость $F(\theta)$, отражающая – в диапазоне зенитных углов, характерных для скважин типа S – эффективность (точнее, величину ей обратную) использования "неортогонального" ($\chi = 20^\circ$) расположения оси чувствительности единственного ДУС по отношению к использованной в качестве базы для сравнения [1] ($\chi = 0$). Уровень точности последней на рис. 7 принят за 1. Эффективность модифицированной схемы – как и ожидалось – особенно заметна для малых зенитных углов: при $\theta = 5^\circ$ точность возрастает в 5 раз, а для $\theta = 2^\circ$ – более, чем в 10 раз.

Заканчивая сравнительный анализ тактико-технических характеристик схем, базирующихся на использовании единственного ДУС, напомним о необходимом для их функционирования условии – грубой стабилизации ("разгрузке") рамки с инерциальными ЧЭ по "углу поворота отклонителя" ("азимуту отклонителя") для "вертикальных" скважин).

В качестве иллюстрации этого тезиса рассмотрим отличную от (22) зависимость

$$F_0(\psi, \theta) = \frac{\sin \theta}{\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi}, \quad (23)$$

характеризующую сравнительную эффективность стандартной (ХУ) продольной компоновки с двумя ДУС и исполнений ГИ с единственным ДУС, рассмотренных в [1] и в настоящей статье, при невозможности управления рамкой в целях грубой стабилизации. Семейство кри-

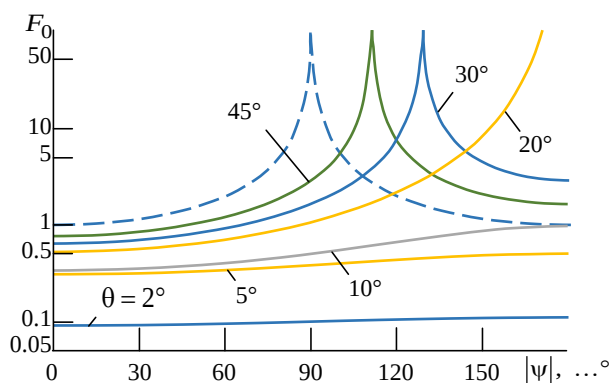


Рис. 8. Точность определения азимута в непрерывном режиме в полном диапазоне углов отклонителя (малые значения F_0 соответствуют большей точности): сплошные линии – неортогональная схема ($\chi = 20^\circ$); штриховая линия – схема при $\chi = 0^\circ$

Fig. 8. Accuracy of azimuth determination in continuous mode over the full range of deflector angles: solid lines – non-orthogonal scheme with $\chi = 20^\circ$; dashed line – scheme with $\chi = 0^\circ$ (small F_0 values correspond to a greater accuracy)

вых для углов $\theta = 2, 5, 10, 20, 30, 45^\circ$ при использовании неортогональной схемы (при $\chi = 20^\circ$) и единственная кривая при $\chi = 0^\circ$ (когда F_0 (23) не зависит от зенитного угла) представлены на рис. 8, который наглядно демонстрирует крайнюю ограниченность эффективности схем с единственным ДУС при невозможности осуществления разгрузки от движения СП (грубой стабилизации) в полном диапазоне угла поворота отклонителя.

Таким образом, схема, модифицированная за счет вывода измерительной оси ДУС из диаметральной плоскости ГИ, в непрерывном режиме сохранив возможность управления подвижной рамкой в целях грубой стабилизации по углу ψ , приобретает важнейшее свойство: влияние дрейфа ДУС на погрешность выработки азимута в зоне переходных – от вертикальных стволов к наклонно направленным – зенитных углов в разы падает, что позволяет сохранить в процессе движения в скважине уже упоминавшуюся повышенную точность начальной выставки ГИ в ее устье.

Заключение. Настоящая статья является продолжением работы [1], в которой были предложены принципы построения и проанализированы режимы работы ГИ, фактически воспроиз-

водящего хорошо известную продольную схему [2–4] с использованием только одного одноосного ДУС. Там же отмечалось, что при всей конструктивно-технической привлекательности этого варианта продольной схемы он воспроизводит и ее принципиальный изъян, характерный в тех или иных проявлениях для любой гироскопической системы с неполной информацией – отсутствие адаптивности к траектории скважины. В настоящей статье предложена минимальная модификация конструкции ГИ, рассмотренной в [1], позволяющая разрешить свойственную продольной (ХУ) схеме проблему съемки стволов, близких к вертикали, в непрерывном режиме. Для этого требуется обеспечить отклонение положения оси чувствительности ДУС на некоторый угол от ортогональности к продольной оси СП. Выбор значения угла неортогональности χ определяются, с одной стороны, конструктивными ограничениями на разворот ДУС выбранного типа при жестко заданных габаритах корпуса СП. Но, с другой стороны, независимо от этих сложностей угол χ не должен быть велик, поскольку эффективность начальной выставки, осуществляемой методом компасирования при вертикальном, как правило, положении СП, падает пропорционально $\cos \chi$. При проектировании ГИ на базе излагаемых идей конструктивно удалось реализовать значение $\chi = 20^\circ$, при котором увеличение погрешности компасирования не выходит за рамки неопределенности статистических характеристик дрейфа ДУС. Этого оказалось достаточно, чтобы реализовать устойчивый непрерывный режим такого ГИ в вертикальных стволах, невозможный в продольной схеме, и получить многократное преимущество перед ней в точности в зоне "переходных" зенитных углов для скважин типа S, "прилегающих к вертикали".

Задачами, ближайшими и завершающими цикл исследования адаптивного универсального ГИ, остается рассмотрение его работы в скважинах типа L, особенно вблизи плоскости горизонта, и сравнительный анализ его точности по отношению к "абсолютной" (трехосной) схеме.

Список литературы

1. Биндер Я. И., Хазов И. А. Универсальный гироскопический датчик на базе единственного одноосного

датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 133–148. doi:

10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

2. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации / Я. И. Биндер, Т. В. Падерина, А. С. Лысенко, А. Н. Федорович // Гироскопия и навигация. 2010. № 4 (71). С. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020

3. Лысенко А. С. О применении гироинклинометра, построенного по продольной схеме в вертикальных скважинах // Материалы XXIX конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова, Санкт-Петербург, 07–09 окт. 2014 / ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2014. С. 137–149.

4. Лысенко А. С. Алгоритмы работы и схема построения гироинклинометра с продольной компоновкой для вертикальных участков стволов скважин // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 72–87. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.072-087

5. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с.

6. Самедов Т. А., Бинятов К. Т., Исмаилзаде К. Г. Исследование состояния работы наклонно направленных морских скважин // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее: сб. ст. XXI Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 05 мая 2019 г. Пенза: Наука и просвещение, 2019. С. 54–58.

7. Быков И. Ю., Борейко Д. А., Блохин П. А. Компьютерное моделирование экспериментальных стендов для исследования прочности захвата насосно-компрессорных труб элеваторов при капитальном ремонте вертикальных и наклонно направленных скважин // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 8 (589). С. 28–34. doi: 10.33285/2782-604X-2022-8(589)-28-34

8. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2016. Vol. 2, № 4. P. 365–395. doi: 10.1007/s40948-016-0038-y

9. Non-pumping reactive wells filled with mixing nano and micro zero-valent iron for nitrate removal from groundwater: Vertical, horizontal, and slanted wells / S. M. Hosseini, T. Tosco, B. Ataie-Ashtiani, C. T. Simmons // J. of Contaminant Hydrology. 2018. Vol. 210. P. 50–64. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.02.006

10. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in

Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic / Y-L. Chen, R. Azzam, T. M. Fernandez-Steeger, L. Li // Geotech. and Geol. Eng. 2009. Vol. 27, № 1. P. 155–167. doi: 10.1007/s10706-008-9220-5

11. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway // Proc. of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Eng. 2013. Vol. 166, iss. 3. P. 280–298. doi: 10.1680/geng.10.00099

12. Чагинов А. В., Суппес И. В., Дорн Э. А. Проходка и строительство стволов № 1 и 2 Усольского калийного комбината компании ОАО "ЕвроХим" // Горный журн. 2013. № 5. С. 51–56.

13. Accuracy Check and Comparative Analysis of Horizontal Fiber-Optic Gyro Inclinator in Freezing Hole / G. Jiang, F. Li, X. Zhou, W. Gao. // E3S Web Conf. 2020. Vol. 218. Art. № 03025. 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/202021803025

14. Малога А. Г. Инклинометры для исследования глубоких и сверхглубоких скважин / НТП "Фактор". Тверь, 2002. 519 с.

15. Биндер Я. И. Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра // Гироскопия и навигация. 2003. Т. 41, № 2. С. 38–46.

16. Гайбуллаев П. М. Добыча остаточных запасов углеводородов при помощи зарезки бокового ствола из бездействующего фонда скважин // Молодой ученый. 2022. № 47(442). С. 35–39.

17. Проектирование схем разбуривания месторождений горизонтальными и многоствольными скважинами / К. Н. Харламов, Г. Н. Шешукова, Т. В. Нестерова, И. Поздеев // Бурение и нефть. 2005. № 10. С. 18–20.

18. Абдуллин А. Ф., Баранников Я. И., Розбаев Д. А. Вовлечение в разработку остаточных запасов углеводородов методом зарезки бокового ствола из неработающего фонда скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. № 9 (357). С. 44–48. doi: 10.33285/2413-5011-2021-9(357)-44-48.

19. Непрерывные гироскопические инклинометры – особенности построения и результаты эксплуатации / А. А. Гуськов, В. В. Кожин, С. В. Кривошеев, Э. В. Фрейман // Каротажник. 2009. № 4 (181). С. 12–30.

20. Фрейман Э. В., Кривошеев С. В., Лосев В. В. Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиростабилизатора // Гироскопия и навигация. 2001. № 1 (32). С. 36–46.

Информация об авторах

Биндер Яков Исаакович – кандидат технических наук (1988), главный конструктор АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", ведущий научный сотрудник кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

Адаптивный к траектории скважины универсальный гироинклинометр на базе одноосного датчика угловой скорости
A Versatile Gyro Inclinator, Adaptive to the Borehole Trajectory, Based on a Uniaxial Angular Rate Sensor

Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 110 научных работ. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Хазов Иван Анатольевич – научный сотрудник АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", аспирант 3-го года обучения кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области подземной навигации; обработка данных.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

References

1. Binder Ya. I., Khazov I. A. Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148 (In Russ.)
2. Binder Ya. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Fedorovich A. N. Various Schemes for Continuous GyroInclinometric Survey of Arbitrarily Oriented Wellbores. Gyroscopy and Navigation. 2010, no. 4 (71), pp. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020 (In Russ.)
3. Lysenko A. S. *O primeneni gironklinometra, postroennogo po prodol'noi skheme v vertikal'nykh skvazhinakh* [On the Use of a Gyroinclinometer Built According to a Longitudinal Scheme in Vertical Wells]. Proc. of the 29th Conf. dedicated to the memory of N. N. Ostyakov, Saint Petersburg, 7–9 Oct. 2014. Concern CSRI Elektropribor, 2014, pp. 137–149. (In Russ.)
4. Lysenko A. S. Algorithms and Design of Longitudinal Gyroinclinometer for Vertical Parts of Wellbores. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation]. 2016, no. 7, pp. 253–263. doi: 10.1134/S207510871603010X
5. Isachenko V. Kh. *Inklinometriya skvazhin* [Well Inclination]. Moscow, Nedra, 1987, 216 p. (In Russ.)
6. Samedov T. A., Binyatov K. T., Ismailzade K. G. *Issledovanie sostoyaniya raboty naklonno-napravlennykh morskikh skvazhin* [Study of the Operating Status of Directional Offshore Wells]. Proc. of the 21st Intern. Scientific and Practical Conf. "Science and Education: Preserving the Past, Creating the Future". Penza, 05 May 2019. Science and Education, 2019, pp. 54–58. (In Russ.)
7. Bykov I. U., Boreiko D. A., Blokhin P. A. Computer Simulation of Experimental Benches to Study the Strength of Elevator Tubing Gripping During Workover of Vertical and Directional Wells. Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex. 2022, no. 8 (589), pp. 28–34. doi: 10.33285/2782-604X-2022-8(589)-28-34 (In Russ.)
8. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on Vertical and Directional Drilling Technologies for the Exploration and Exploitation of Deep Petroleum Resources. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2016, vol. 2, no. 4, pp. 365–395. doi: 10.1007/s40948-016-0038-y
9. Hosseini S. M., Tosco T., Ataie-Ashtiani B., Simmons C. T. Non-Pumping Reactive Wells Filled with Mixing Nano and Micro Zero-Valent Iron for Nitrate Removal from Groundwater: Vertical, Horizontal, And Slanted Wells. J. of Contaminant Hydrology. 2018, vol. 210, pp. 50–64. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.02.006
10. Chen Y. L., Azzam R., Fernandez-Steege T. M., Li L. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic. Geotech Geol Eng. 2009, vol. 27, iss. 1, pp. 155–167. doi: 10.1007/s10706-008-9220-5
11. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of Ground Freezing Data from the Naples Subway. Proc. of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Eng. 2013, vol. 166, no. 3, pp. 280–298. doi: 10.1680/geng.10.00099
12. Chaginov A. V., Suppes I. V., Dorn E. A. Drilling and Construction of Shafts no. 1 and 2 of the Usolsky Potash Plant of the Company OJSC "EuroChem". *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2013, no. 5, pp. 51–56. (In Russ.)
13. Jiang G., Li F., Zhou X., Gao W. Accuracy Check and Comparative Analysis of Horizontal Fiber-Optic Gyro Inclination in Freezing Hole. E3S Web Conf. 2020, vol. 218, art. no. 03025, 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/202021803025
14. Malyuga A. G. *Inklinometriya dlya issledovaniya glubokikh i sverkhglubokikh skvazhin* [Inclinometers for Studying Deep and Ultra-Deep Wells]. Tver', NTP "Faktor", 2002, 519 p. (In Russ.)
15. Binder Ya. I. Analytical Compassing in Slim Hole Inclination. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 2 (41), pp. 38–46. (In Russ.)
16. Gaibullaev P. M. Extraction of Residual Hydro-

Carbon Reserves by Sidetracking from Idle Wells. *Молодой ученый* [Young Scientist]. 2022, no. 47 (442), pp. 35–39. (In Russ.)

17. Kharlamov K., Sheshukova G., Nesterova T., Pozdeev I. Design of Field Drilling Schemes with Horizontal and Multilateral Wells. *Бурение и нефть* [Drilling and Oil]. 2005, no. 10, pp. 18–20. (In Russ.)

18. Abdullin A. F., Barannikov Ya. I., Rozbaev D. A. Involvement in the Development of Residual Hydro-Carbon Reserves by Sidetracking from Idle Well Stock. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas*

Fields. 2021, no. 9 (357), pp. 44–48. doi: 10.33285/2413-5011-2021-9(357)-44-48

19. Gus'kov A. A., Kozhin V. V., Krivosheev S. V., Freiman E. V. Continuous Gyroscopic Inclometers - Design Features and Operating Results. *NTV "Karotazhnik"*. 2009, no. 4 (181), pp. 12–30. (In Russ.)

20. Freiman E. V., Krivosheev S. V., Losev V. V. Features of Algorithms Creating for Orientation of Gyroscopic Inclometers Based on a Uniaxial Gyrostabilizer. *Гироскопия и навигация* [Gyroscopy and Navigation]. 2001, no. 1 (32), pp. 36–46. (In Russ.)

Information about the authors

Yakov I. Binder, Cand. Sci. (1988), Chief designer of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation, leading researcher of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 110 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of marine and underground navigation.

Address: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Ivan A. Khazov, researcher of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of underground navigation; data processing.

Address: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>