

диаметре приборов 76 мм. Датчики токовихревого и индукционного типов требуют корректировки показаний в зависимости от температуры. Датчики индукционного типа могут применяться в многорычажных профилемерах. Электромагнитный токовихревой датчик линейных перемещений может применяться в скважинных приборах с рабочей температурой до 250 °С и выше.

УДК 550.8.088

Н. Г. Козыряцкий

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Оценены диапазоны значений погрешностей инклинометрических исследований, предложены меры по снижению этих погрешностей.

Ключевые слова: скважина, инклинометрия, погрешности, калибровка инклинометров.

Основным источником информации о пространственном положении оси ствола скважины (в дальнейшем – оси скважины) являются инклинометрические исследования (инклинометрия). Конечная цель этих исследований – получение декартовых координат оси скважины и информации об участках ее оси, имеющих неприемлемые значения интенсивностей искривления, затрудняющих или делающих невозможным выполнение определенных технических задач при строительстве скважин, например спуск обсадной колонны, постановку фильтров и пр.

Точное определение координат точек оси ствола скважины имеет важное практическое значение при геометризации месторождения, определении мощности и интервала залегания продуктивного пласта с целью более точной его геологической привязки, для точного определения разрыва сплошности пласта и для решения других маркшейдерских и горно-технических задач.

Принципиальная важность знания фактического пространственного положения ствола скважины обусловлена большой дороговизной

глубокого бурения и существенными экономическими затратами, связанными с ликвидацией различного рода аварий, вызванных некачественными инклинометрическими исследованиями, и необходимостью перебуривания стволов скважин.

Точное соблюдение заданных пределов отклонения стволов наклонно направленных скважин или скважин с естественным искривлением особенно важно при следующих обстоятельствах:

- существование жестких условий раздела участков месторождения;
- необходимость предотвращения пересечения стволов скважин;
- осуществление проводки разгрузочной или специальной технологической скважины вблизи ствола аварийной скважины (например, для осуществления подземного взрыва, закачки реагентов);
- проводка горизонтальных стволов в пластах малой мощности.

Инклинометрическим исследованиям свойственен целый ряд погрешностей, которые в рамках данной статьи целесообразно разделить на три класса:

- инструментальные, называемые также аппаратурными;
- технологические;
- погрешности обработки результатов измерений.

Предложенное разделение погрешностей по классам и названия классов вводятся только в рамках данной статьи и не претендуют на безусловные, а служат для понимания их источников.

Ниже рассмотрены источники названных погрешностей и проведена их количественная оценка.

Инструментальные погрешности

К инструментальным погрешностям относятся погрешности, свойственные собственно инклинометру как средству измерения.

Источники этого вида погрешностей для широкой номенклатуры инклинометров достаточно подробно исследованы и описаны в научно-технической литературе и в фондовых материалах, поэтому их подробное описание и анализ здесь не приводятся. Для примера достаточно назвать некоторые из этих источников, общие для разных типов инклинометров:

- трение в узлах вращения ориентирующих рамок (платформ) и собственно датчиков углов (например, в синус-косинусных вра-

щающихся трансформаторах, гироскопических и маятниковых подвесах и др.);

- курсовые уходы гироскопов;
- погрешности ориентации блоков датчиков относительно оси охранныго кожуха инклинометра, чаще всего встречающиеся, когда калибруются только датчики инклинометра, а в собранном виде инклинометр не калибруется;
- погрешности, связанные с инерционностью акселерометров;
- гистерезисные явления в феррозондах;
- температурные погрешности и др.

Здесь следует обратить внимание на составляющую инструментальной погрешности, вносимую при калибровке инклинометра. В соответствии с [11, 15] границы погрешности инклинометра при калибровке необходимо определять по формуле

$$\Delta(\alpha)_{\text{сум}} = \sqrt{[\Delta(\alpha)_{\text{инкл}}]^2 + \Delta(\alpha)_{\text{калибр.уст}}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta(\alpha)_{\text{сум}}$ – суммарная погрешность инклинометра при измерении угла α по результатам калибровки с учетом погрешности применяемой калибровочной установки; $\Delta(\alpha)_{\text{инкл}}$ – собственная погрешность инклинометра при измерении угла α по результатам калибровки без учета погрешности калибровочной установки; $\Delta(\alpha)_{\text{калибр.уст}}$ – погрешность применяемой калибровочной установки при воспроизведении угла α .

Формула (1) записана в предположении, что погрешности калибруемого инклинометра и калибровочной установки – чисто случайные.

На практике погрешность калибровочной установки зачастую игнорируется по причине ее кажущейся несущественности по сравнению с погрешностью испытываемого инклинометра. Такая ситуация имела место 15–20 лет тому назад, когда погрешности измерения инклинометрами были на порядок больше погрешностей калибровочных установок. При таком соотношении между погрешностями инклинометров и калибровочных установок вносимая последними погрешность находилась в пределах $\pm (0,5\text{--}3,0)\%$, что считалось вполне приемлемым.

Современные же инклинометры стали существенно точнее, точнее стали и калибровочные установки, но не в такой мере, как инклинометры (справедливо утверждение, что “существующие метрологические установки пространственной ориентации находятся в пограничном состоянии по требованиям точности к современной инклинометри-

ческой аппаратуре” [3]). Вносимые калибровочными установками погрешности уменьшились и стали сопоставимы с погрешностями самих инклинометров, что требует их обязательного учета в составе погрешности инклинометра.

При этом следует иметь в виду, что чаще всего для калибровочных установок декларируются так называемые “погрешности шкал” (погрешности до монтажа установки), но не указываются погрешности установки начала шкал (например, по азимуту – на север), погрешности, вызванные негоризонтальностью плоскости вращения зажимных приспособлений при задании различных значений углов, а также вызванные нарушением ортогональности основных осей вращения калибровочной установки, погрешности, обусловленные кратковременными и долгопериодическими вариациями и неоднородностью магнитного поля Земли в зоне калибровки инклинометра, и целый ряд других погрешностей. Их совместное воздействие существенным образом увеличивает вносимую погрешность, которая может даже превышать погрешность инклинометра.

Запись в протоколе калибровки инклинометра о том, что при калибровке получены нулевые погрешности инклинометра, не должна вводить в заблуждение – там обязательно присутствуют погрешности калибровки.

Технологические погрешности

Измерения углов искривления оси ствола скважины и их последующая обработка осуществляются в предположении, что ось скважинного прибора если и не совпадает с осью ствола скважины, то, по крайней мере, ей параллельна, а “геометрический центр” блока датчиков в максимальной степени совпадает с точкой записи данных инклинометрии по глубине скважины.

К сожалению, в силу различных причин эта идеализированная модель измерений не совпадает с реальными условиями исследований – на прямолинейных, но имеющих отклонение от вертикали, участках ствола скважины ось свободно висящего (не лежащего на стенке скважины) инклинометра практически всегда не совпадает с осью скважины. Для участков скважины, ось которой имеет значительные интенсивности искривления, что в связи с бурным развитием горизонтального бурения встречается достаточно часто, разным

точкам скважинного прибора по его длине будут соответствовать существенно разные значения углов оси ствола скважины.

Строго говоря, инклинометр измеряет не углы скважины, а свое “собственное” пространственное положение, не всегда совпадающее с положением оси скважины в пространстве.

В качестве примера на рис. 1, *a* представлена идеализированная ситуация, когда скважинный прибор инклинометра отклоняется от оси прямолинейного участка ствола скважины в максимально возможной степени, соприкасаясь разноименными концами противоположных стенок скважины. Как видим, измеренный инклинометром зенитный угол скважины $\theta_{\text{изм}}$ отличается от действительного зенитного угла скважины θ_d на величину γ , определяемую из выражения

$$\gamma = \theta_d - \theta_{\text{изм}}. \quad (2)$$

Угол γ и есть максимальная погрешность измерения угла (в рассматриваемом случае – зенитного), вызванная несоосностью скважинного прибора инклинометра и ствола скважины.

Очевидно, что значение угла γ определяется соотношениями между диаметрами ствола скважины D и охранного кожуха инклинометра d , а также длиной скважинного прибора s .

Количественное значение угла γ можно определить на основе несложных тригонометрических построений, из которых вытекает следующее выражение:

$$\gamma = \arccos \frac{b + a\sqrt{1 + a^2 - b^2}}{1 + a^2}, \quad (3)$$

где параметр a характеризует отношение длины скважинного прибора s к диаметру охранного кожуха d инклинометра:

$$a = s/d, \quad (4)$$

а параметр b характеризует отношение диаметров скважины D и охранного кожуха d инклинометра:

$$b = D/d. \quad (5)$$

Реальные значения параметра a находятся в диапазоне от 20 до 70, а параметра b – в пределах от 1,1 (рудно-угольные скважины) до 6,5 (нефтегазоразведочные скважины).

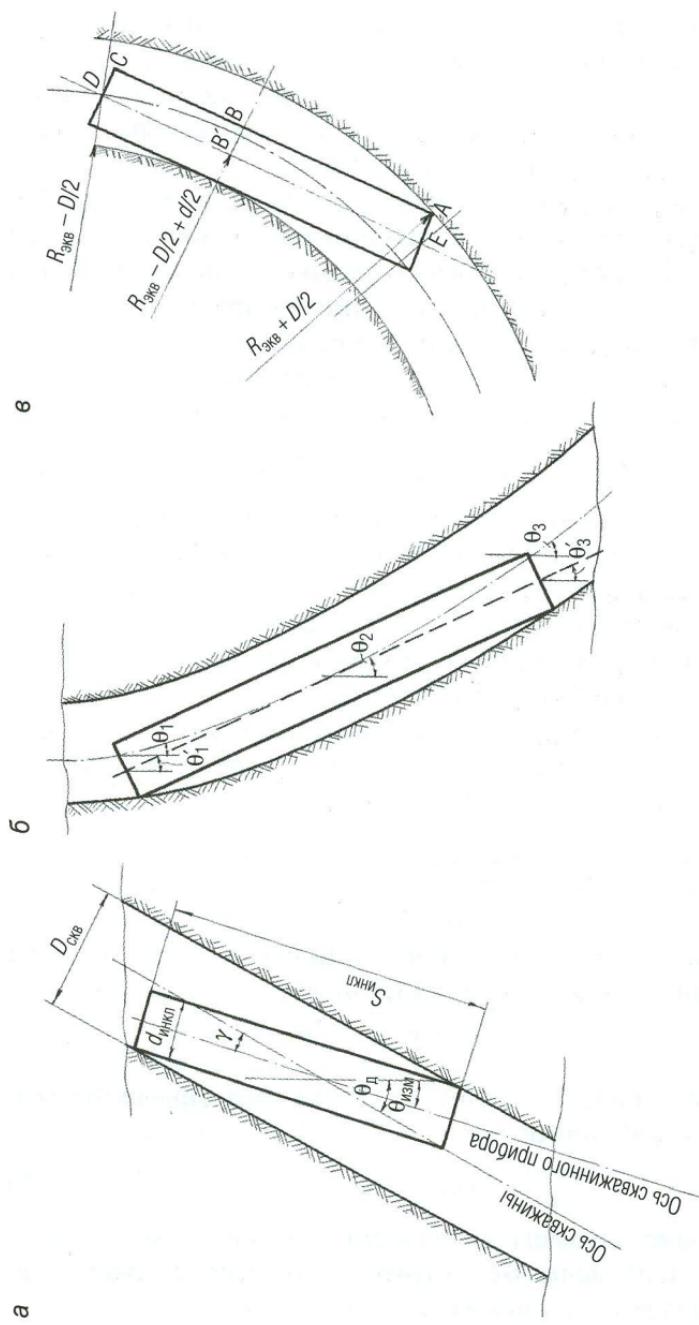


Рис. 1. Расположение скважинного прибора: а – неосоосное расположение скважинного прибора и ствола скважины; б – расположение в скважине с большой интенсивностью искривления; в – произвольное расположение в скважине с большой интенсивностью искривления

В табл. 1 приведены значения угла γ , рассчитанные для приведенных выше значений параметров a и b , на рис. 2 – зависимости угла γ от параметра a для различных значений параметра b , на рис. 3 – зависимости угла γ от параметра b для различных значений параметра a .

Таблица 1

Значения угла γ для различных значений
параметров a и b

Значения параметра a	Значение угла γ , град					
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
20	2,87	5,75	8,66	11,60	14,57	17,60
30	1,91	3,83	5,75	7,68	9,62	11,58
40	1,43	2,87	4,31	5,75	7,19	8,64
50	1,15	2,29	3,44	4,59	5,75	6,90
60	0,96	1,91	2,87	3,83	4,78	5,74
70	0,82	1,64	2,46	3,28	4,10	4,92

Из табл. 1 и рис. 2, 3 следует, что угол γ , то есть погрешность, вызванная несоосностью скважинного прибора и ствола скважины, может достигать больших значений, особенно при малых значениях параметра a , то есть при малой длине скважинного прибора, и при больших значениях параметра b , то есть при больших диаметрах скважины.

При этом следует иметь в виду, что рассматриваемые погрешности по природе своей являются систематическими, то есть обладают свойством накапливаться, что приводит к накоплению погрешностей расчета координат точек скважины и увеличению так называемых эллипсов рассеяния координат.

Из проведенного анализа следует также, что для снижения рассматриваемых погрешностей нужно увеличивать длину скважинного прибора s , например, за счет снабжения охранного кожуха инклинометра удлинителем. Однако эта мера целесообразна до определенных значений параметра a , так как угол γ ощутимо уменьшается при увеличении параметра a до значений порядка 40–50, дальнейшее увеличение длины охранного кожуха существенного выигрыша не дает.

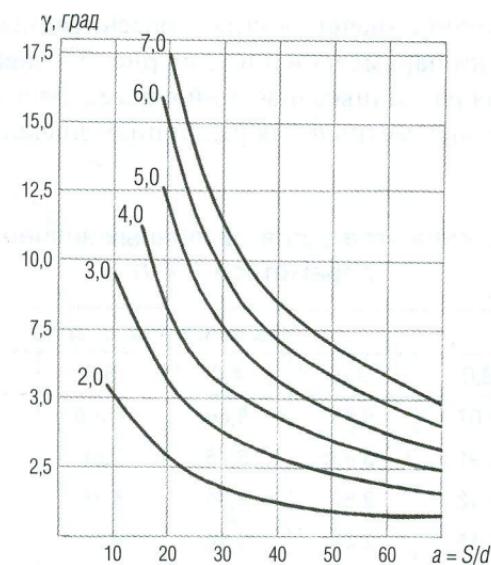


Рис. 2. Зависимости угла γ от параметра a для различных значений параметра b

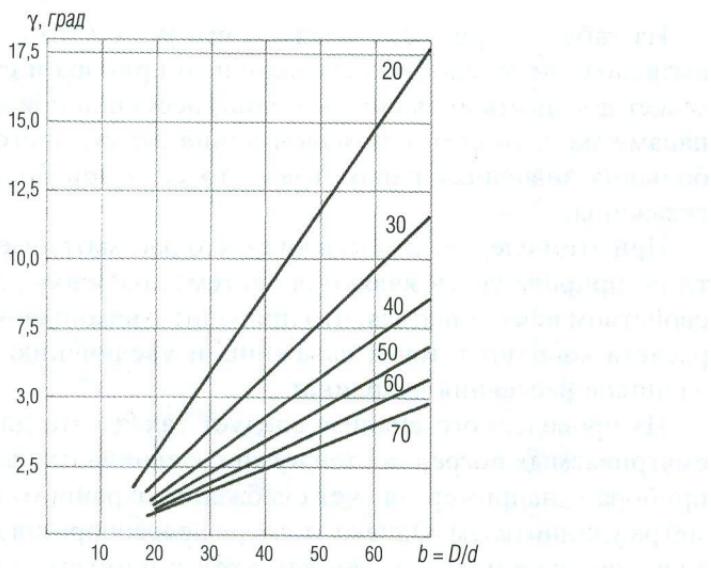


Рис. 3. Зависимости угла γ от параметра b для различных значений параметра a

К тому же следует иметь в виду, что длина охранного кожуха ограничивается возможностью обеспечения его прямолинейности и проходимостью скважинного прибора при малых значениях диаметров скважин и больших интенсивностях искривления.

Применение для скважинных исследований длинных сборок, в которых инклинометр, как правило, всегда является концевым прибором, ситуацию не улучшает – длинные сборки компонуются с несколькими шарнирными (карданными) устройствами, поэтому длина жестких участков сборок не обеспечивает существенного снижения рассматриваемых погрешностей. Кроме того, прямолинейность сборок или другими словами соосность скважинных приборов в сборках – параметр, не подлежащий контролю, равно как не подлежит контролю и степень искривления (непрямолинейности) охранных кожухов по их длине.

Можно говорить о том, что в длинных сборках положением инклинометра в пространстве “управляет” не только гравитационное поле Земли, но и сборка скважинных приборов, что в последнем случае чаще всего непредсказуемо.

Разнообразие и необычность источников рассмотренных погрешностей можно продемонстрировать еще одним примером. Иногда неправильная заделка груzonесущего кабеля в кабельный наконечник приводит к потере соосности между скважинным прибором и кабелем и в месте заделки кабеля возникает момент, отклоняющий скважинный прибор от вертикали. Это явление наблюдается для “легких” скважинных приборов, используемых в рудно-угольных скважинах, хотя при высокой плотности промывочной жидкости “легкими” могут стать любые скважинные приборы, в том числе используемые в нефтегазовых скважинах. Известно и решение этой проблемы – снабжение скважинного прибора инклинометра утяжелителем.

В совокупности перечисленные факторы могут обеспечить дополнительную погрешность измерения углов инклинометром, вполне сопоставимую с основной (для примера – отклонение от прямолинейности трубы, из которой изготовлен охранный кожух, в 1 мм на 1 м – это 3,5 угловых минуты дополнительной погрешности инклинометра, а труба с такими параметрами считается изделием очень хорошего качества).

Другой очевидный (но на практике не используемый) путь снижения рассматриваемого класса погрешностей – уменьшение параметра b , то есть увеличение “диаметра” охранного кожуха инклинометра,

причем слово “диаметр” не следует понимать буквально – снижения погрешностей можно добиться, снабдив инклинометр центраторами.

Как уже отмечалось, на рис. 1 проиллюстрирована идеализированная ситуация, при которой охранный кожух инклинометра отклоняется от оси ствола скважины, находясь при этом в плоскости искривления ствола скважины, то есть дополнительные погрешности измерения азимута не возникают. Реально же несоосное расположение охранного кожуха инклинометра может быть самым произвольным в любой вертикальной плоскости, что будет иметь следствием неточные измерения как зенитных углов, так и азимутов. Известно, что погрешности измерения азимута закономерно увеличиваются с уменьшением зенитных углов скважины и несоосное со стволом скважины положение инклинометра, приводящее к меньшему отклонению его от вертикали по сравнению со стволом скважины, может на порядок–полтора увеличить погрешность измерения азимута скважины. Тот факт, что вертикальные (вернее говорить – “субвертикальные”, так как отклонение от вертикали все же имеет место) скважины в плане отклоняются незначительно, не должен успокаивать – чаще всего несанкционированно пересекаются стволы именно вертикальных скважин, пробуренных с одного куста, и практически всегда из-за некачественной инклинометрии.

Существенного, практически на порядки, снижения рассматриваемых погрешностей можно достичь, если определить с достижимой на сегодня точностью положение оси инклинометра относительно оси скважины. При достаточно качественном стволе (отсутствие каверн, развитых желобов, вывалов, мощных глинистых корок) определению подлежит положение инклинометра относительно стенок скважины. Для этого достаточно комплексировать инклинометр с двумя профилемерами (рычажными или акустическими) вверху и внизу инклинометра. Корректный алгоритм обработки информации, полученной от верхнего и нижнего профилемера, позволит получить информацию о расположении верхней и нижней точек оси инклинометра относительно оси скважины и в конечном итоге о перекосе инклинометра.

Рассмотрим случай, когда ось ствола скважины имеет заметное искривление на длине, равной (или сопоставимой) длине инклинометра (рис. 1, б). Ситуация нередкая – при выходе скважины на горизонтальный участок интенсивность искривления может достигать 0,6–1,0 °/м и даже больше.

Если скважина имеет постоянную интенсивность искривления (для примера рассматривается плоскоискривленная скважина, то есть с постоянным азимутом), то скважинный прибор инклинометра занимает в пространстве положение с зенитным углом, который имеет ось скважины на глубине, совпадающей с серединой скважинного прибора.

Очевидно, что в этом случае точность инклинометрических исследований будет зависеть, кроме прочего, от правильности привязки по глубине измеренных углов.

В случае, если блок датчиков инклинометра находится примерно посередине скважинного прибора, при привязке измерений к верхней части скважинного прибора дополнительная погрешность измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_B$ определяется по формуле

$$\Delta[\theta]_B = \theta_2 - \theta_1, \quad (6)$$

а при привязке измерений к нижней части скважинного прибора дополнительная погрешность измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_H$ определяется по формуле

$$\Delta[\theta]_H = \theta_2 - \theta_3. \quad (7)$$

Обозначения в формулах (6) и (7) видны из рис. 1, б.

В табл. 2 приведены значения погрешностей измерения зенитных углов, вызванные неправильной привязкой измерений по глубине, для различных значений интенсивностей искривления.

Таблица 2

Погрешности измерения зенитного угла при неправильной привязке измерений по глубине, град

Интенсивность зенитного искривления, °/м	Длина скважинного прибора, м			
	1,5	2,0	3,0	4,0
0,04	0,03	0,04	0,06	0,08
0,16	0,12	0,16	0,24	0,32
0,64	0,48	0,64	0,96	1,28

Примечание. При привязке измерений к верхней части скважинного прибора погрешности имеют знак “-”, к нижней – знак “+”.

Из табл. 2 следует, что рассматриваемые погрешности по своему значению могут быть соизмеримыми и даже превышать инструмен-

тальные погрешности инклинометров, особенно при больших длинах охранных кожухов и значительных интенсивностях искривления.

Очевидно, что для снижения рассматриваемых погрешностей привязку данных инклинометрических измерений следует осуществлять к геометрическому центру угловых датчиков.

Оценим количественные значения рассматриваемых погрешностей для случая, когда на длине скважинного прибора ось ствола скважины имеет заметное искривление, а сам скважинный прибор не ложится на стенку скважины (рис. 1, в).

Для данной ситуации скважинный прибор занимает положение в вертикальной плоскости (случай плоскоискривленной скважины с постоянной интенсивностью искривления), соответствующее зенитному углу $\theta_{\text{инкл}}$, определяемому по одному из двух выражений:

$$\theta_{\text{инкл}} = \theta_1 + \arctg \frac{2[s - \sqrt{(2R_{\text{экв}} + d)(D - d)}]}{2R_{\text{экв}} - D + d} \quad (8)$$

или

$$\theta_{\text{инкл}} = \theta_2 - \arctg \frac{2\sqrt{(2R_{\text{экв}} + d)(D - d)}}{2R_{\text{экв}} - D + d}, \quad (9)$$

где θ_1 , θ_2 – фактический зенитный угол скважины на глубине, соответствующей верхней и нижней части скважинного прибора соответственно; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус искривления оси скважины; D – диаметр ствола скважины; d – диаметр охранного кожуха инклинометра; s – длина скважинного прибора.

Эквивалентный радиус искривления оси скважины $R_{\text{экв}}$ определяется из выражения

$$R_{\text{экв}} = \frac{57,3}{i_{\theta}}, \quad (10)$$

где i_{θ} – интенсивность зенитного искривления оси скважины, определяемая по формуле

$$i_{\theta} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{L}, \quad (11)$$

где L – длина дуги оси ствола скважины между верхней и нижней частями скважинного прибора инклинометра.

Очевидно, что при привязке результатов инклинометрических исследований к верхней части скважинного прибора ошибка в измерении зенитного угла $\Delta[\theta]$ будет определяться выражением

$$\Delta[\theta]_B = \theta_{\text{инкл}} - \theta_1 = \arctg \frac{2[s - \sqrt{(2R_{\text{ЭКВ}} + d)(D - d)}]}{2R_{\text{ЭКВ}} - D + d}, \quad (12)$$

а при привязке к нижней части скважинного прибора ошибки в измерении зенитного угла $\Delta[\theta]_H$ выражением

$$\Delta[\theta]_H = \theta_{\text{инкл}} - \theta_2 = -\arctg \frac{2\sqrt{(2R_{\text{ЭКВ}} + d)(D - d)}}{2R_{\text{ЭКВ}} - D + d}. \quad (13)$$

В табл. 3 приведены значения погрешностей $\Delta[\theta]_B$, в табл. 4 – погрешностей $\Delta[\theta]_H$. На рис. 4 и 5 приведены зависимости погрешностей $\Delta[\theta]_B$ и $\Delta[\theta]_H$ от интенсивности искривления оси ствола скважины.

Таблица 3

Погрешности измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_B$ при произвольном расположении скважинного прибора в скважине с большой интенсивностью искривления, град

Интенсивность зенитного искривления, °/м	Разница диаметров скважины D и скважинного прибора d , мм				
	10	20	50	100	250
	Величины погрешности				
0,02	<u>-0,06</u> -0,04	<u>-0,09</u> -0,07	<u>-0,15</u> -0,13	<u>-0,22</u> -0,20	<u>-0,36</u> -0,34
0,04	<u>-0,08</u> -0,03	<u>-0,12</u> -0,07	<u>-0,21</u> -0,16	<u>-0,31</u> -0,26	<u>-0,51</u> -0,46
0,08	<u>-0,09</u> -0,01	<u>-0,15</u> -0,09	<u>-0,28</u> -0,21	<u>-0,42</u> -0,23	<u>-0,70</u> -0,50
0,32	<u>-0,06</u> +0,34	<u>-0,19</u> +0,21	<u>-0,44</u> +0,04	<u>-0,72</u> -0,32	<u>-1,27</u> -0,87

Примечание. В числителе указаны погрешности для длины скважинного прибора $s = 1,5$ м, в знаменателе $s = 4$ м.

Из табл. 3 и 4, а также рис. 4 и 5 следует, что рассматриваемые погрешности по своему значению соизмеримы и могут даже превышать инструментальные погрешности инклинометров, особенно при значительных интенсивностях искривления; эти погрешности по природе своей также являются систематическими и обладают свойством накапливаться.

Таблица 4

Погрешности измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_B$ при произвольном расположении скважинного прибора в скважине с большой интенсивностью искривления, град

Интенсивность зенитного искривления, °/м	Разница диаметров скважины D и скважинного прибора d , мм				
	10	20	50	100	250
	Величины погрешности				
0,02	-0,08	-0,11	-0,17	-0,24	-0,38
0,04	-0,11	-0,15	-0,21	-0,34	-0,48
0,08	-0,15	-0,21	-0,34	-0,48	-0,76
0,32	-0,30	-0,43	-0,68	-0,96	-1,51

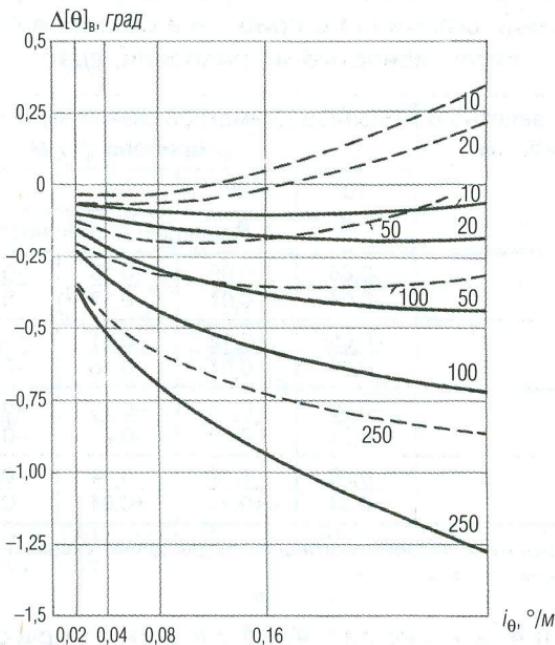


Рис. 4. Зависимости погрешности измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_B$ при произвольном расположении скважинного прибора в скважине с большой интенсивностью искривления, град. Пунктир – длина скважинного прибора 4,0 м; сплошная линия – длина скважинного прибора 1,5 м. Цифрами обозначена разница в диаметрах скважины и скважинного прибора (мм)

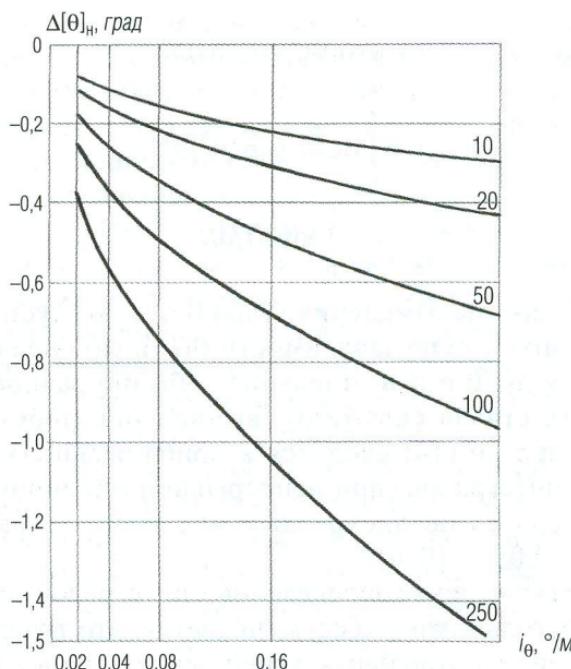


Рис. 5. Зависимости погрешности измерения зенитного угла $\Delta[\theta]_H$ при произвольном расположении скважинного прибора в скважине с большой интенсивностью искривления, град. Цифрами обозначена разница в диаметрах скважины и скважинного прибора (мм)

Погрешности обработки результатов измерений

Как уже отмечалось, конечной целью инклинометрических исследований является определение пространственного положения оси скважины, а именно декартовых координат точек оси скважины, путем расчетов по определенному алгоритму, в которых участвуют непосредственно измеренные углы и глубины точек измерения углов с присущими им погрешностями.

Эти погрешности являются причиной появления при расчете координат скважины методических погрешностей, обусловленных несовершенством используемого алгоритма расчета координат.

Декартовые координаты точки ствола скважины, находящейся на глубине L , можно определить из системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 x &= \int_0^L \sin \theta(l) \cos \alpha(l) dl, \\
 y &= \int_0^L \sin \theta(l) \sin \alpha(l) dl, \\
 z &= \int_0^L \cos \theta(l) dl,
 \end{aligned} \tag{14}$$

где $\theta(l)$ и $\alpha(l)$ – законы изменения углов θ и α по глубине скважины.

Так как аналитические зависимости $\theta(l)$ и $\alpha(l)$ неизвестны, а известны только углы θ и α в отдельных, обычно равноотстоящих по глубине, точках ствола скважины, вычисление пространственных координат x , y и z по (14) сводится к приближенному вычислению определенных интегралов (при непрерывной инклинометрии расчеты также проводятся по дискретным интервалам, как правило, не превышающим 0,05–0,10 м).

На практике вычисление определенных интегралов осуществляется методом прямоугольников, то есть считается, что траектория ствола скважины состоит из отдельных линейных участков с постоянными значениями зенитного угла и азимута для каждого участка ствола.

Для этого вида расчета координат осей скважин разработано несколько методов, сущность которых сводится к аппроксимации исследуемого интервала скважины (участка между двумя соседними точками измерения углов) прямой линией или двумя прямыми линиями. Подробный анализ этих методов выполнен в [7, 8]. Один из этих методов (метод усреднения углов) регламентирован нормативными документами [13, 14].

Всем этим модификациям метода прямоугольников свойственны следующие недостатки [7]:

- криволинейные участки оси ствола скважины между точками измерений считаются прямолинейными или состоящими из нескольких прямолинейных участков;
- не во всех модификациях метода в полной мере учтено то обстоятельство, что при пространственном искривлении скважин зенитные углы исследуемого интервала находятся в разных вертикальных пересекающихся плоскостях.

Существуют и более сложные алгоритмы расчета координат, в которых ось скважины между двумя точками измерений аппрокси-

мируется дугой или двумя криволинейными участками. В случае, когда предполагается, что закон изменения углов θ и α между двумя очередными измерениями является линейным, траектория ствола скважины рассматривается как состоящая из отдельных дуг окружностей с различными радиусами кривизны. На практике эти алгоритмы широкого распространения не получили.

Разработан алгоритм, в котором декартовы координаты оси скважины приближенно описываются непрерывной гладкой функцией с заданной наперед погрешностью [12]. Этот алгоритм отличается громоздкостью и сложностью реализации, затрудняющими его использование на практике, так как порядок используемых полиномов в аппроксимирующей функции равен количеству точек измерений плюс два.

Здесь уместно заметить, что пространственное положение оси скважины по сути – “история движения” бурового инструмента и бурильной колонны, и их траектория движения не может иметь произвольный вид, несмотря на множество воздействующих на них факторов (сил и моментов). Исследования некоторых авторов [6] показывают, что практически любая пространственная ось искривленной скважины с любой необходимой для практики точностью описывается несложным полиномом порядка не выше четвертого, что делает весьма перспективным разработку алгоритмов, описывающих ось скважины не как кусочно-аппроксимированную, а как непрерывную функцию.

Методические погрешности, свойственные разным методам расчета координат, имеют весьма значительный разброс от метода к методу и зависят, в первую очередь, от выбранного метода расчета координат, шага измерений и параметров искривления оси скважины.

При выборе того или иного метода расчета координат следует стремиться не только к минимизации погрешностей аппроксимации, но и оценивать погрешности расчета координат, имея в виду, что в расчетах участвуют аргументы (измеренные углы и глубина), известные с конечной точностью. Разные методы расчета координат имеют разную “чувствительность” к этим погрешностям.

Предельная (максимальная) $\delta[A_k]$ и среднеквадратическая $\sigma[A_k]$ ошибки определения координаты A_k , характеризующие рассеяние координат точек оси скважины (так называемые круги или эллипсы рассеяния), определяются по формулам

$$\delta[A_k] = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^m \left| \frac{\partial F_k(x_{im})}{\partial x_m} \right| \delta[x_m], \quad (15)$$

$$\sigma[A_k] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^m \left| \frac{\partial F_k(x_{im})}{\partial x_m} \sigma[x_m] \right|^2}, \quad (16)$$

где A_k – определяемая координата (X – северная координата; Y – восточная координата; Z – вертикальная координата); $F_k(x_{im})$ – функция, описывающая алгоритм расчета координаты A_k по измеренным аргументам x_m (длина исследуемого i -го интервала l_i , θ_{i1} и θ_{i2} – зенитные углы, измеренные в верхней и нижней части исследуемого i -го интервала соответственно; α_{i1} и α_{i2} – азимуты, измеренные в верхней и нижней части исследуемого i -го интервала соответственно); $\delta[x_m]$ и $\sigma[x_m]$ – предельные и среднеквадратические погрешности соответственно определения аргумента x_m (погрешности измерения глубины, инструментальные погрешности инклинометра); n – количество шагов инклинометрических измерений.

Очевидно, что при выборе алгоритма расчета координат следует руководствоваться, кроме прочего, соображениями минимизации множителя $\frac{\partial F_k(x_{im})}{\partial x_m}$ в выражениях (15) и (16).

Следует иметь в виду, что в соответствии с [5] в зоны рассеяния координат, определенные по предельным погрешностям, скважины попадают с вероятностью, практически равной единице, что обусловлено большими значениями принимаемых инструментальных погрешностей инклинометров и правилами суммирования предельных погрешностей. На практике зоны рассеяния координат, вычисленные по предельным погрешностям инклинометров, почти не используются для решения общих геологических и технических задач – их можно использовать для грубых оценок, когда требуется оценить степень попадания забоя скважины в заданный круг допуска.

Однако в случае, когда при калибровке инклинометров оцениваются раздельно систематическая и случайная составляющие погрешности инклинометра, необходимо использовать этот способ определения рассеяния координат для оценки отклонения ствола скважины, вызванного систематическими погрешностями, а для оценки зоны рассеяния этого отклонения использовать случайные составляющие погрешности инклинометра (среднеквадратичные ошибки). Такой подход обеспечивает значительное уменьшение круга рассеяния координат оси скважины.

В настоящей статье рассмотрены далеко не все источники погрешностей инклинометрических исследований. Влияние магнитных масс в скважине без его минимизации или учета может быть причиной неустранимого брака всего массива измерений по скважине. Практика показывает, что регламентируемые в [13] расстояния между магниточувствительными датчиками инклинометров и ферромагнитными массами в скважине для современных инклинометров недостаточны. Чтобы реализовать высокие точностные показатели инклинометров, магнитные массы должны находиться на расстоянии не менее 40 м.

В статье в качестве примера приведены экстремальные значения погрешностей разного вида, на практике встречающиеся с малой вероятностью. Реальные значения погрешностей в массе своей будут меньшими, может быть и на порядок. Однако это не должно быть успокаивающим фактором – все рассмотренные погрешности, присущие одному интервалу (шагу) измерения, суммируются по длине скважины – это одно из специфических свойств инклинометрических исследований, а “необъяснимое поведение” оси скважины или невозможность “сшить” траекторию скважины из отдельных частей, полученных в разное время и разными инклинометрами, могут быть вызваны суммарным воздействием незначительных величин рассмотренных в статье погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атамов Ф. А. К вопросу вычисления пространственных координат ствола наклонной скважины // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 1970. № 8 (530). С. 17–19.
2. Булатов А. И., Проселков Е. Ю., Проселков Ю. М. Бурение горизонтальных скважин. Краснодар: Советская Кубань, 2008. 424 с.
3. Гарейшин З. Г. Совершенствование метрологического обеспечения инклинометрии нефтегазовых скважин: Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Уфа: Центр метрологических исследований “Урал-Гео”, 2006.
4. Голубинцев О. Н. Метод вычисления координат точек измерения пространственно искривленной оси скважины // Разведка и охрана недр. 1970. № 12. С. 18–23.
5. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. С. 86–87.
6. Калинин А. Г. Искривление скважин. М.: Недра, 1974.
7. Козыряцкий Н. Г. Совершенствование методики и системы метрологического обеспечения инклинометрических исследований в нефтяных и газовых скважинах. Тверь: ВНИГИК, 1986.

8. Козыряцкий Н. Г. Анализ точности расчета координат ствола скважины по данным инклинометрии // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 98. С. 115–122.
9. Крейг Дж. Т. мл., Рэндол Б. В. Методы расчета пространственного положения стволов наклонных скважин // Инженер-нефтяник. 1976. № 3. С. 22–29.
10. Кузьмин В. И., Парфенов Б. П., Карпенко З. С. Вычисления координат точек оси ствола искривленной скважины // Разведка и охрана недр. 1977. № 3. С. 21–25.
11. МУ 41-17-1373-87 Отраслевая система обеспечения единства измерений. Инклинометры и ориентаторы. Методика поверки.
12. Полиномиальная методика обработки массива данных дискретной инклинометрии буровой скважины для расчета пространственных координат точек ее оси. Экспресс-информация ВНИИОЭНГ. Сер. "Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море". М., 1991. № 5. С. 7–10.
13. РД 153-39.0-072-01 Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М., 2001.
14. РД 41-17-1375-87 Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах. Калинин, 1987.
15. СТО ЕАГО 033-01-96 Геофизическая аппаратура и оборудование. Аппаратура для инклинометрии необсаженных скважин. Параметры, характеристики, требования. Методы контроля и испытаний.