

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ТРАЕКТОРИЙ РАЗВЕДОЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ИСКРИВЛЕННЫХ СКВАЖИН

В. П. РОЖКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры техники разведки)

Все буровые скважины в той или иной степени подвержены искривлению даже в том случае, если при бурении принимались специальные меры предосторожности. Поэтому во многих разведочных организациях наряду с использованием мер по уменьшению искривлений, скважины стали профилировать с учетом их будущих естественных траекторий. Применяемые для этого эмпирические способы в большинстве случаев недостаточно учитывают закономерности искривления и содержат допущения, не подтверждающиеся практикой. В связи с этим в специальной литературе появилось несколько работ [3, 5, 6, 11], посвященных математическому описанию искривленных скважин. В одних работах поставленная задача решается аналитическими способами, в других — статистическими. Так как методы анализа в известной степени предопределяют конечный результат, то необходимо подробнее рассмотреть эти направления и определить области их использования при изучении искривления скважин.

Предварительно отметим, что на искривление скважин оказывает влияние большое количество разнообразных факторов. По характеру воздействия, как было показано ранее [4, 7], они разделяются на две группы. Первая включает в себя факторы, закономерно изменяющие общую кривизну (кручение) скважин, а вторая — факторы, искажающие закономерное искривление.

В работе Б. З. Султанова [11] делается попытка определить траекторию скважин аналитическим путем. Вполне понятно, при таком подходе учесть все факторы искривления невозможно. Поэтому в работе рассматривается только часть факторов первой группы и совершенно не принимаются во внимание факторы второй группы. На примере этой работы можно убедиться, насколько трудно при аналитическом подходе связать факторы искривления с траекторией скважины. Не случайно при выводе формул оси скважины в работе использовано предположение, что она по зениту и азимуту изгибается в виде параболы. Между тем предмет этого предположения является целью всей работы.

Попутно отметим, что в работе Б. З. Султанова [11] допущены не менее значительные ошибки и иного характера. Так, при выводе формул, по существу, принято, что ось снаряда постоянно находится в одной и той же плоскости при максимально перекошенном состоянии, а первопричиной искривления скважин во всех случаях являются контакты твердых и мягких пород (причем, идеально ровные). Подобные

идеализации допустимы только при приближенном качественном анализе, однако в работе находим, что полученные «формулы дадут возможность производить расчет отклонения скважины от заданного направления». Приведем одну из этих формул. Горизонтальное смещение скважины при дробовом бурении рекомендуется определять по зависимости

$$I = \frac{kf \pi \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot h_{\text{мин}} \cdot \delta \cdot R (D_{\text{ск}} - D_{\text{н}}) \cdot H^2}{2(EI) \cdot \text{tg}(\gamma - \Theta_0) \cdot n \cdot L}, \quad (1)$$

где k — поправочный коэффициент (его величина в работе не определена); f — коэффициент перемежаемости пород геологического разреза; $\sigma_{\text{сж}}$ — временное сопротивление породы сжатию, осредненное для геологического разреза; $h_{\text{мин}}$ — осредненная минутная скорость бурения; δ — диаметр буровой дроби; R — расстояние между реактивными силами, действующими на коронку со стороны твердой и мягкой породы при встрече контакта пород различных по твердости; $D_{\text{ск}}$, $D_{\text{н}}$ — диаметры скважины и колонковой трубы; H — интервал, для которого определяется смещение скважины относительно вертикали; (EI) — жесткость колонны труб; γ — угол падения пород; Θ_0 — зенитный угол забурки скважины; n — число оборотов бурового снаряда; L — длина полуволны изогнутой колонны.

По утверждению автора анализируемой работы «область практического приложения формулы (15)* весьма обширна». Однако легко убедиться, что часть параметров этой формулы очень трудно определить с количественной стороны (L , R , k , f , $\sigma_{\text{сж}}$) или имеет переменную величину (L , R , n , $D_{\text{ск}}$, $D_{\text{н}}$, EI), и неизвестно, каким образом определять средние значения. Если еще вспомнить о допущениях, сделанных при выводе, то можно заключить, что зависимости, подобные (1), никакого практического значения не имеют.

Оценивая возможности аналитического направления, можно отметить, что аналитические зависимости не могут учитывать искажающие факторы (так как последние в большинстве случаев не поддаются количественной оценке), и если не прибегать к значительной громоздкости конечных зависимостей, то не будет учтена часть факторов первой группы. Кроме того, некоторые факторы этой группы также трудно определить с количественной стороны. Значительные трудности представляет выбор наиболее существенных факторов, так как в одних условиях ими могут оказаться одни, в других — иные.

Таким образом, аналитический подход может служить одним из основных средств качественного изучения процесса искривления скважин [2, 7, 9], но не средством определения траекторий скважин для количественных расчетов.

Первая попытка количественно определить траекторию скважин только методами статистического анализа, по-видимому, принадлежит Н. О. Якоби [13]. Из-за сложности пространственной траектории он анализировал только лишь зенитное искривление. Для определения профиля скважины по замерам зенитного искривления строились горизонтальная (X) и вертикальная (Y) проекции скважины. Такие проекции (в отличие от проекций, построенных с учетом азимутального искривления) названы им модифицированными. Изучая модифицированные проекции, Н. О. Якоби пришел к заключению, что за счет зенитного искривления «...наклонные дробовые скважины имеют тенденцию к образованию линий типа гиперболы» и могут быть описаны уравнением

$$X = \frac{Y}{a + b Y}, \quad (2)$$

* В данной статье — это формула (1).

где a и b — эмпирические коэффициенты, определяемые для каждой анализируемой скважины.

Формула (2) в настоящее время имеет только научное значение. Практическое значение ее невелико, так как она не учитывает причин искривления и рассчитана на анализ единичных скважин.

Для целей профилирования важно определить не профиль нескольких конкретных скважин, а по большому количеству замеров искривления выявить усредненную траекторию, характерную для конкретного месторождения (участка). В связи с этим на кафедре техники разведки Томского политехнического института несколько лет назад начали проводиться работы по созданию методики статистического изучения причин и закономерностей искривления скважин. С. С. Сулакшиным предложен общий статистический анализ [8, 9, 10] искривленных скважин, который включает в себя исследование частоты отклонения участков или скважины в целом (по зениту и азимуту), определение отклонений скважины (по зениту и азимуту) в зависимости от глубины и зенитного угла, определение средней кривизны на отдельных интервалах и т. п. Отдельные виды статистических зависимостей из этого анализа могут служить основой для определения усредненной траектории скважин на месторождении.

А. А. Сорокиным [5, 6] при определении усредненной траектории в основу была положена статистическая зависимость приращения зенитных и азимутальных углов от глубины. Позже этой зависимостью (правда, только для зенитных углов) пользовался А. М. Курмашев [3]. В результате математической обработки упомянутой статистической связи ими получены зависимости в виде полинома

$$X = \sum C_n L^n \text{ при } n = 1, 2, 3; \quad (3)$$

где X — приращение величины зенитного (или азимутального) угла от начального; L — глубина скважины; C_n — эмпирические коэффициенты.

Так как величина приращения по формулам вида (3) не зависит от угла заложения, то все скважины на месторождении авторами рекомендуется делить на группы с близкими зенитными углами забурки и для каждой группы определять свои эмпирические коэффициенты (C_n)

Зависимости вида (3) трудно использовать для практических целей, не прибегая к громоздким расчетам или упрощениям. Так, если начинать профилирование скважины от точки подсечения и определять место и зенитный угол забурки (а это гораздо правильнее, чем профилировать от точки забурки), то задача может быть решена или путем пробных расчетов для нескольких групп коэффициентов (C_n), или путем подбора наиболее подходящего типового профиля, который должен быть построен для каждой группы скважин. Во втором случае однозначно определяется только место забурки, а зенитный угол заложения придется принимать в тех пределах углов, для которых построен использованный профиль.

Таким образом, выбор исходной зависимости в работах [3, 5, 6] произведен неудачно.

В целом статистическое направление является единственно верным путем к определению профиля искривленных скважин, так как позволяет получить довольно простые конечные зависимости, учитывающие большинство факторов обеих групп. Кроме того, с помощью статистических зависимостей можно определить границы применимости направленного бурения, основанного на закономерностях искривления, следующим образом. Скважины, заданные в одном направлении и пробуренные в сходных условиях, следуют не по одной и той же траектории, а обра-

зуют изогнутый конус рассеивания [11, 12]. Поперечные сечения этого конуса легко определить путем учета среднеквадратических отклонений эмпирических коэффициентов в конечных зависимостях. Сопоставление сечений конуса с разведочной сетью приводит к возможности упомянутой оценки. Следует также отметить, что для повышения эффективности статистического способа необходимо произвести правильный выбор параметров, в зависимости от которых следует рассматривать искривление.

Очевидно, чем полнее наши знания о причинах и закономерностях искривления скважин, а также обширнее исследуются искривленные скважины (кавернометрия, ориентированный керн и т. п.), тем объективнее можно выбрать эти параметры. Поэтому по мере изучения естественного искривления скважин они будут меняться, и рекомендовать тот или иной параметр для постоянного использования невозможно. Остановимся только на общих соображениях по их выбору.

Каждый параметр должен быть выбран так, чтобы включал в себя по возможности большее число единичных факторов искривления (т. е. являлся результатом действия или обуславливал их появление) и в то же время имел простую количественную характеристику. Такой параметр будем называть комплексным. Под единичным фактором понимается фактор, учитывающий какую-либо узкую область явлений (например, диаметр бурового наконечника, диаметр дроби и т. п.). В такой трактовке комплексный параметр является промежуточным звеном между суммой всех причин (факторов) искривления и результатом их действия.

Искривление в конечном счете обуславливается перекосом колонкового снаряда в скважине. Направление и интенсивность искривления зависят от угла между осью колонкового снаряда и осью призабойного участка скважины, а также положения плоскости, проходящей через эти оси. Это, по существу, и есть наиболее комплексные факторы искривления скважин, но они не могут быть приняты для практических целей, так как снаряд в скважине постоянно вибрирует, меняет свое положение и величину перекоса, из-за чего предугадать средний перекос и плоскость, в которой он будет занимать преобладающее положение, не представляется возможным.

При современных методах замера искривленных скважин и существующей изученности причин искривления за комплексный фактор можно принять зенитный угол или глубину. Наиболее общим следует считать зенитный угол, так как от величины зенитного угла призабойного участка зависят силы, отклоняющие буровой снаряд к лежащей стенке, и частично ориентация призабойного участка по отношению к линии наименьшего сопротивления разбуриваемой анизотропной горной породы, в то время как с глубиной связывается только результат искривления.

При дальнейшем изучении формы траекторий разведочных скважин за комплексные факторы можно принять, например, одновременно диаметр скважины и зенитный угол или диаметр скважины, зенитный угол и угол между простиранием основных структур месторождения и азимутальным направлением скважины и т. п.

Формы статистического анализа могут быть самыми разнообразными. Так, например, средствами корреляционного анализа можно определять количественную взаимосвязь между параметрами искривления и принятыми комплексными факторами искривления или воспользоваться теорией стохастических процессов. Принципиально возможно применение теории цепей Маркова [1], так как буровой снаряд выбуривает скважину, которая затем становится для него направляющим каналом. Иначе говоря, будущее положение скважины в основном определяется

настоящим положением ее призабойного участка и не зависит от положения этого участка в прошлом.

Статистический подход оказывается еще более эффективным, если зависимости параметров искривления скважин от избранных комплексных факторов определять в дифференциальном виде. Интегрирование этих зависимостей и использование граничных условий позволят получить частные формулы для различных условий проведения скважин при наименьших объемах вычислительных работ.

В результате статистического изучения получаются зависимости между параметрами искривления и принятыми комплексными факторами, а также константами, входящими в эти зависимости. Величиной констант и их вероятными отклонениями от средних значений будут учитываться все факторы, органически не вошедшие в принятые комплексные факторы. Совершенно очевидно, чем полнее учитываются единичные факторы выбранными комплексными факторами, тем точнее описывается усредненная траектория искривленных скважин и тем меньше среднеквадратические отклонения констант, вследствие чего теоретический конус рассеивания приближается к естественному. Последнее обусловлено тем, что при статистическом подходе изучения траектории скважин теоретический конус рассеивания учитывает не только наиболее вероятное фактическое рассеивание стволов, но и частично влияние единичных факторов, не учтенных выбранными комплексными факторами.

Дальнейшего уточнения траектории скважин можно достичь путем увеличения числа комплексных факторов или изыскания более общих факторов. Второй путь, очевидно, более перспективен, так как позволит получить более простые зависимости. Остановимся на определении траектории усредненной естественно-искривленной скважины путем определения корреляционной связи между зенитным углом и кривизной скважин, пробуренных на одном и том же месторождении. Предварительно сделаем замечание о терминологии и способе отдельного определения отклонений скважины по зениту и азимуту.

Любую усредненную траекторию скважин можно представить линией в вертикальной поверхности, изогнутой в соответствии с горизонтальной проекцией. Такую поверхность будем называть апсидальной по аналогии с апсидальной плоскостью [7, 9]. Апсидальная плоскость всегда будет касаться с апсидальной поверхностью по вертикальной линии. Предлагаемое представление усредненной траектории скважин способствует более простому подходу к их математическому описанию. В данном случае изучение пространственного искривления скважин полностью заменяется изучением их горизонтальных проекций и изучением искривления в апсидальной поверхности.

Математическое описание пространственно-искривленных скважин следует начинать с отыскания закона искривления в апсидальной поверхности, так как длина горизонтальных проекций (а следовательно, и кривизна) зависит от искривления в апсидальной поверхности.

Математическое описание усредненной траектории получается наиболее простым, если подавляющее большинство анализируемых скважин не имеет характерных перегибов ствола, приуроченных к определенным горизонтам, а достаточно плавно увеличивает (или уменьшает) свой зенитный угол.

Располагая по таким скважинам данными о величинах зенитных углов, можно найти эмпирическую зависимость

$$K_a = \frac{\Theta_{i+1} - \Theta_i}{l_{i+1} - l_i} = \frac{\Delta \Theta_i}{\Delta l_i} = f_1(\Theta_i), \quad (4)$$

где l_i , l_{i+1} , Δl_i — соответственно, глубина i и $i+1$ точки скважины и расстояние между этими точками; Θ_i , Θ_{i+1} , $\Delta \Theta_i$ — зенитный угол

в i и $i+1$ точках скважины и приращение зенитного угла между этими точками; K_a — средняя кривизна скважины между точками замеров.

Если приращение Δl принять небольшим (по сравнению с длиной скважины), а по эмпирической табличной зависимости (4) известными методами составить эмпирическую формулу $F_1(\Theta)$, которая наилучшим образом описывала бы эмпирические данные, то зависимость (4) можно представить в виде дифференциального уравнения

$$K_a = \frac{d\Theta}{dl} = F_1(\Theta). \quad (5)$$

Путем интегрирования уравнения (5) легко получить зависимость между глубиной скважины и зенитным углом. Вертикальная и горизонтальная проекции скважины могут быть определены по уравнениям

$$dz = dl \cdot \cos \Theta,$$

$$ds = dl \cdot \sin \Theta,$$

известным из дифференциальной геометрии, если в них подставить значение элемента длины скважины из выражения (5). После соответствующей подстановки получим дифференциальные уравнения

$$dz = \frac{\cos \Theta}{F_1(\Theta)} d\Theta, \quad (6)$$

$$ds = \frac{\sin \Theta}{F_1(\Theta)} d\Theta, \quad (7)$$

а после их интегрирования — искомые проекции (рис. 1, а):

$$Z = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \frac{\cos \Theta}{F_1(\Theta)} d\Theta, \quad (8)$$

$$S = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \frac{\sin \Theta}{F_1(\Theta)} d\Theta. \quad (9)$$

где Θ_0 , Θ_i — зенитный угол забурки и текущий зенитный угол скважины.

Если скважины не имеют искривления в горизонтальной плоскости, то их траектории полностью описываются уравнениями (8) и (9). В случае пространственного искривления горизонтальная проекция скважины криволинейная и ее можно разложить на две взаимно перпендикулярные оси, расположенные в горизонтальной плоскости (рис. 1, б). Вертикальная проекция скважины зависит только от искривления в апсидальной поверхности, поэтому выражение (8) справедливо одновременно для плоско- и пространственно-искривленных скважин.

Дифференциальный закон азимутального искривления должен содержать дифференциал азимутального направления, функцию изменения этого дифференциала в зависимости от зенитного угла и дифференциал зенитного угла. Связь между этими величинами можно выразить следующим простым соотношением

$$\frac{d\alpha}{d\Theta} = F_2(\Theta). \quad (10)$$

Эмпирический аналог уравнения (10) можно записать в виде

$$\frac{\Delta \alpha_i}{\Delta \theta_i} = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} = f_2(\theta). \quad (11)$$

Накладывая на эту зависимость аналогичные условия и делая те же операции, что и с выражением (4), получим дифференциальное уравнение (10).

Закон азимутального поворота скважины можно определить путем решения интеграла

$$\alpha = \int F(\theta) d\theta, \quad (12)$$

а величину полного азимутального поворота —

$$\alpha_{\text{п}} = \int_{\theta_0}^{\theta_i} F_3(\theta) d\theta. \quad (13)$$

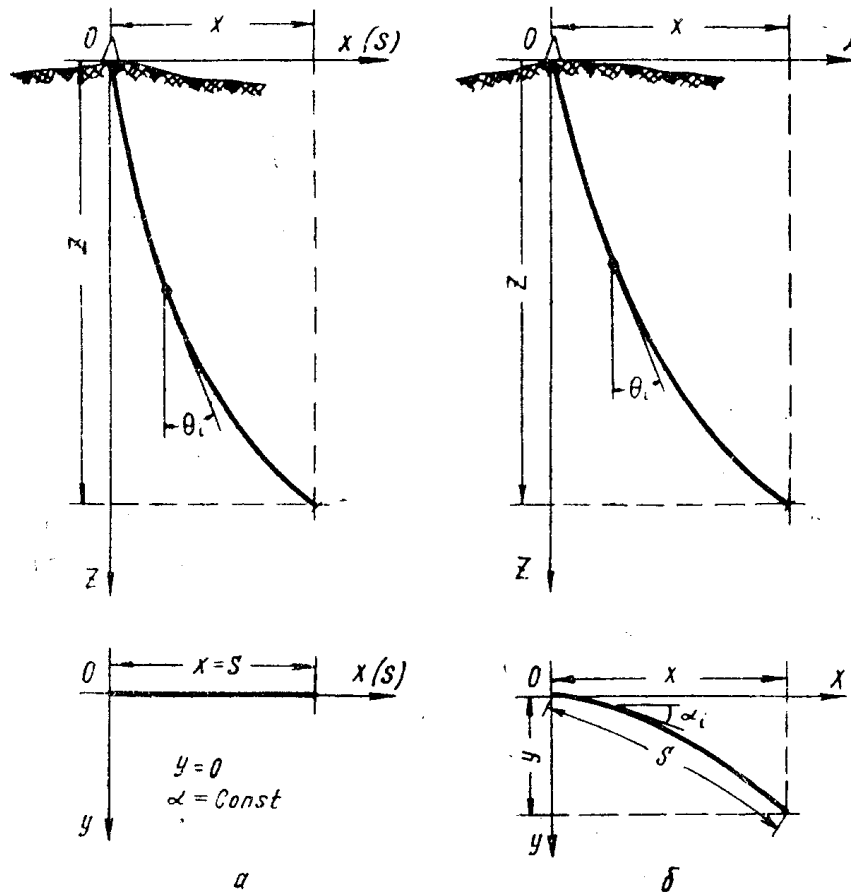


Рис. 1. Схема проекций искривленной скважины на координатные плоскости: а — для плоско-искривленной скважины; б — для пространственно-искривленной скважины.

Проекция скважины на горизонтальные оси могут быть определены аналогично выражениям (8) и (9). Для этого воспользуемся теми же зависимостями из дифференциальной геометрии. Применительно к рассматриваемому случаю они запишутся в виде

$$\begin{aligned} dx &= ds \cdot \cos \alpha, \\ dy &= ds \cdot \sin \alpha. \end{aligned}$$

Подставив в эти исходные выражения значение ds из выражения (7), а закон азимутального поворота скважины — из уравнения (12), проинтегрировав их, получим проекции скважины на горизонтальные оси

$$X = \int_{\theta_0}^{\theta_i} \frac{\sin \theta}{F_1(\theta)} \cos \left[\int F_3(\theta) d\theta \right] d\theta, \quad (14)$$

$$Y = \int_{\theta_0}^{\theta_i} \frac{\sin \theta}{F_1(\theta)} \sin \left[\int F_3(\theta) d\theta \right] d\theta. \quad (15)$$

В случае, если подинтегральные выражения в зависимостях (8), (9), (14) и (15) окажутся очень громоздкими и интегрировать будет очень сложно или вообще невозможно, то в подинтегральных выражениях функции $F_1(\theta)$ и $\int F_3(\theta) d\theta$ необходимо заменить табличными эмпирическими зависимостями $f_1(\theta)$ и $f_4(\theta) = (\alpha_i - \alpha_0)$ и по ним вычислить табличные значения подинтегрального выражения. После этого по табличным значениям можно составить эмпирическую формулу так, чтобы она наилучшим образом описывала эмпирические данные. Вместо подинтегрального выражения необходимо подставить эту формулу и решить интеграл. Эмпирическую формулу надо подбирать такого вида, чтобы она легко интегрировалась. Как показала практика обработки эмпирических данных, зависимость (5) чаще всего представляет собой уравнение прямой линии или параболы, а зависимость (10) — уравнение экспоненциального вида. В таких случаях затруднений при интегрировании выражений (8), (9), (12) и (13) не возникает. Для решения уравнений (14) и (15) следует произвести вышеописанную замену.

Итак, для того, чтобы получить проекции пространственно-искривленной скважины, достаточно определить эмпирические зависимости по выражениям (4) и (11), а затем по ним перейти к эмпирическим формулам (5) и (10). Подставив эти эмпирические формулы в зависимости (8), (14), (15) и проинтегрировав в указанных пределах, получим искомые проекции. В случае обработки плоско-искривленных скважин вычисления ограничиваются зависимостями (4), (5), (8) и (9). Преимущества зависимостей, полученных по данной методике, описаны нами ранее [4].

Конус рассеивания естественно-искривленных скважин может быть определен путем соответствующего учета возможных отклонений констант, вошедших в уравнения (8), (9), (14) и (15). Сопоставление поперечных размеров конуса с размерами разведочной сети позволит определить область эффективного применения направленного бурения с использованием естественного искривления на интересующих месторождениях.

Выводы

1. Для целей математического описания естественно-искривленных скважин аналитические («динамические», «детерминированные») зависимости непригодны по многим причинам. Достаточно точного описания можно достичь при выделении комплексных факторов искривления и изучении траекторий скважин статистическим путем.

2. Для первого приближения за комплексные параметры можно принять зенитный угол или зенитный угол забурки и глубину одновременно, но в таком случае преимущество надо оставлять за зенитным углом забурки.

3. С целью определения более общих уравнений траектории скважин и сокращения объема вычислительных работ зависимости между параметрами искривления и комплексными факторами следует искать в дифференциальном виде.

4. Разработанные способы описания траекторий естественно-искривленных скважин позволят достаточно точно определить профили усредненных скважин на месторождениях, что в свою очередь может послужить основой для более точного проектирования плоско- и пространственно-искривленных скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. Физматгиз, М., 1961.
2. А. Г. Калинин. Искривление буровых скважин. Гостоптехиздат, М., 1963.
3. А. К. Курмашев. Исследование естественных профилей геологоразведочных скважин вероятностно-статистическими методами. Сб. Методика и техника разведки, № 44, ОНТИ ВИТР, 1964.
4. В. П. Рожков, Ю. Л. Боярко. Некоторые причины и закономерности зенитного искривления скважин при дробовом бурении. Изв. вузов. Геол. и разв., № 3, 1965.
5. А. А. Сорокин. Об искривлении разведочных скважин. Бюлл. цветн. металлург., № 24 (125), 1958.
6. А. А. Сорокин. Закономерности искривления скважин и методика их выявления. Информ. сб. геологоразведочн. службы Рудного Алтая, вып. 1, Усть-Каменогорск, 1960.
7. С. С. Сулакшин. Руководство по измерению искривления скважин. Госгеолтехиздат, М., 1954.
8. С. С. Сулакшин, А. А. Сорокин. О некоторых закономерностях искривления скважин в условиях Кузбасса. Разведка и охрана недр, № 7, 1958.
9. С. С. Сулакшин. Искривление скважин и способы его измерения. Изд. второе. Госгеолтехиздат, М., 1960.
10. С. С. Сулакшин. Основные вопросы методики выявления закономерностей искривления скважин. Сб. Методика и техника разведки, № 48, ОНТИ ВИТР, 1964.
11. Б. З. Султафов. Аналитическое исследование причин закономерного искривления скважин. Изв. вузов. Геол. и разв., № 8, 1962.
12. Н. Ф. Фролов, Е. Ф. Фролов. Геологические наблюдения и построения при бурении искривленных скважин. Гостоптехиздат, 1957.
13. Н. О. Якоби. О форме искривления наклонных дробных скважин. Разведка недр, № 5, 1936.