

УДК 621.317

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПОНЕНТОВ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА
НА ОСНОВЕ ФЕРРОЗОНДОВ**

Е. А. Пономарева, к. т. н.

Ключевые слова: погрешность, феррозонд, СКС ориентации, инклинометрический преобразователь, кинематическая схема

Постановка проблемы. Обеспечение энергоресурсами – один из основных вопросов независимости государства. Украина за счет собственной добычи обеспечивает себя нефтью только на 25–27 % [1; 2]. В то же время, доля энергии, которая расходуется в Украине, составляет 2,2 % мировой, тогда как ее население – меньше 1 % человечества. Годовое потребление газа в Украине составляет в среднем 70–73 миллиарда кубометров.

Наша страна не богата нефтью. Месторождения нефти в Украине стары и расположены не сплошными огромными запасами, а рассыпаны на больших территориях и из-за глубокого залегания трудно поддаются освоению. В итоге, себестоимость добычи нефти в Украине очень высока.

Однако украинские специалисты полагают, что потенциал недр Украины позволяет увеличить уже разведанные запасы углеводородного сырья (газ и нефть с конденсатом) на 80–90 % при значительном увеличении объемов геологоразведочных работ [3; 4].

Одним из направлений интенсификации добычи нефти и газа является создание современных информационно-измерительных систем бурения (ИИС-бурение). Специализированная компьютерная система (СКС) ориентации бурового инструмента является одной из подсистем ИИС-бурение и выполняет следующие функции: на основе объективной глубинной информации о технологических параметрах проходки задает максимальную скорость движения забоя по проектной траектории, обеспечивает безопасность и качество буровых работ. СКС ориентации бурового инструмента на основе современной техники должна обеспечить интенсификацию производства, повышение качества добычи и снижение себестоимости продукции.

При создании СКС ориентации бурового инструмента возникает проблема, связанная с разработкой и внедрением первичных инклинометрических преобразователей (ИП) как компонентов СКС, предназначенных для контроля и регистрации параметров траектории скважины и угла установки отклонителя.

Анализ публикаций. Решению задачи построения моделей ИП для оптимального выбора структуры устройства, определения связи между отдельными параметрами, оценки их влияния на характер установившихся режимов посвящено много публикаций [5–14]. Тем не менее, повышение эффективности определения параметров искривления скважины путем разработки новых методов и способов создания инклинометрических преобразователей СКС ориентации бурового инструмента, которые бы обеспечили упрощение процесса измерения азимута, зенитного и визирного углов, а также повысили их точность, остается сегодня актуальной задачей.

Цель статьи. Предложена математическая модель инклинометрического преобразователя как компонента СКС ориентации бурового инструмента, позволяющая повысить точность измерения углов ориентации в несколько раз за счет использования однотипных феррозондов в качестве первичных преобразователей.

Основной материал. Для измерения магнитного азимута, зенитного угла наклона скважины, угла установки отклонителя в настоящее время еще применяются инклинометры с магнитной стрелкой в карданных рамках, выполненных по кинематической схеме карданных подвесов с разным расположением рамок (ИП1, ИП2). В конструкциях более современных феррозондовых инклинометрических преобразователей в качестве датчика азимута используются феррозонды, которые устанавливаются на горизонтируемой платформе внутренней рамки. Сигналы с феррозондов пропорциональны синусу и косинусу азимута. Азимут определяется как арктангенс отношения двух измеренных сигналов с учетом знаков этих сигналов. С использованием феррозондов можно определять не только азимут, но и зенитный

угол. Для этого феррозонды устанавливают на внутренней и внешней рамках. Наиболее перспективной схемой использования феррозондов является схема ИП4 с жестко закрепленными в теле скважинного прибора преобразователями.

Использование в качестве чувствительных элементов ИП одностипных малогабаритных феррозондовых преобразователей позволяет уменьшить диаметр скважинного прибора до 38 – 40 мм. Так как феррозондовые преобразователи не подвержены влиянию вибраций, то на их основе возможно создание виброустойчивых преобразователей зенитного и визирного углов. Отсутствие электроники в погружной части позволяет значительно расширить диапазон рабочих температур.

Таким образом, создание ИП на основе одностипных феррозондовых преобразователей, в которых три феррозонда жестко закреплены в корпусе, три установлены на внешней рамке и три – на внутренней, предназначенных для измерения пространственного положения скважины, является актуальной технической задачей.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема предложенного ИП на основе феррозондов.

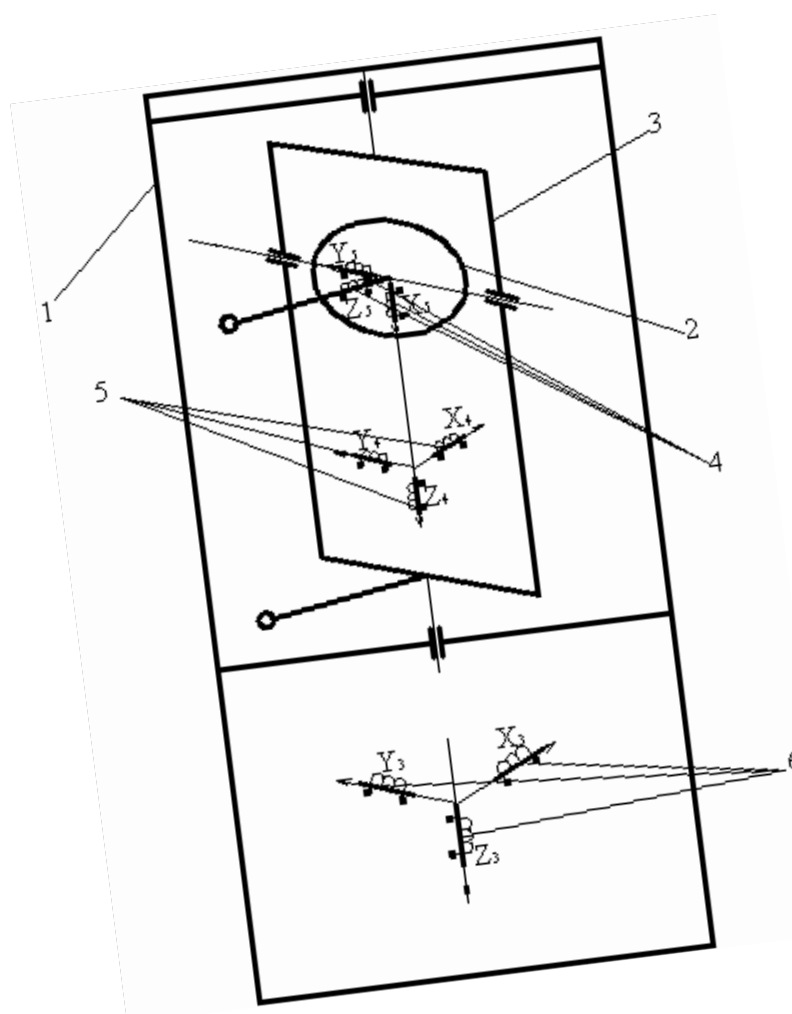


Рис. 1. Кинематическая схема феррозондового ИП:

- 1 – корпус ИП; 2 – внутренняя рамка; 3 – наружная рамка; 4 – феррозонды, закрепленные на горизонтированной площадке; 5 – феррозонды, закрепленные во внутренней рамке; 6 – феррозонды, неподвижно закрепленные в теле скважинного прибора

Проекция вектора \vec{T} в базисе $R_3 (0x_3y_3z_3)$, связанного с корпусом ИП, в базисе $R_4 (0x_4y_4z_4)$, связанного с рамкой с эксцентричным грузом, которая устанавливается в плоскость наклона скважины, в базисе $R_5 (0x_5y_5z_5)$, связанного с горизонтированной площадкой, определяется из матричных соотношений:

$$\vec{T}_{R3} = A_{\varphi(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \vec{T}_R, \quad (1)$$

иначе
$$\begin{pmatrix} T_{X3} \\ T_{Y3} \\ T_{Z3} \end{pmatrix} = A_{\varphi(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \cdot \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ Z \end{pmatrix}.$$

$$\vec{T}_{R4} = A_{\beta(3)}^T A_{\varphi(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \vec{T}_R \quad (2)$$

или
$$\begin{pmatrix} T_{X4} \\ T_{Y4} \\ T_{Z4} \end{pmatrix} = A_{\beta(3)}^T A_{\varphi(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \cdot \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ Z \end{pmatrix}.$$

$$\vec{T}_{R5} = A_{\delta(2)}^T A_{(\varphi-\beta)(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \vec{T}_R \quad (3)$$

или в развернутом виде
$$\begin{pmatrix} T_{X5} \\ T_{Y5} \\ T_{Z5} \end{pmatrix} = A_{\delta(2)}^T A_{(\varphi-\beta)(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \cdot \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ Z \end{pmatrix},$$
 где $A_{\delta}, A_{\beta}, A_{\varphi}, A_{\theta}, A_{\alpha}$ – матрицы

направляющих косинусов.

Проекция вектора \vec{T} в скалярном виде, записывается в виде следующих скалярных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_{X3} &= H(\cos \varphi \cos \theta \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha) - Z \cos \varphi \sin \theta, \\ T_{Y3} &= H(-\sin \varphi \cos \theta \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha) + Z \sin \varphi \sin \theta, \\ T_{Z3} &= H \sin \theta \cos \alpha + Z \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{X4} &= H(\cos(\varphi - \beta) \cos \theta \cos \alpha - \sin(\varphi - \beta) \sin \alpha) - Z \cos(\varphi - \beta) \sin \theta, \\ T_{Y4} &= H(-\sin(\varphi - \beta) \cos \theta \cos \alpha - \cos(\varphi - \beta) \sin \alpha) + Z \sin(\varphi - \beta) \sin \theta, \\ T_{Z4} &= H \sin \theta \cos \alpha + Z \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{X5} &= H(\cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \theta \cos \alpha - \cos \delta \sin(\varphi - \beta) \sin \alpha + \sin \delta \sin \theta \cos \alpha) + \\ &+ Z(-\cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \theta + \sin \delta \cos \theta), \\ T_{Y5} &= H(-\sin(\varphi - \beta) \cos \theta \cos \alpha - \cos(\varphi - \beta) \sin \alpha) + Z \sin(\varphi - \beta) \sin \theta, \\ T_{Z5} &= H(-\sin \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \theta \cos \alpha + \sin \delta \sin(\varphi - \beta) \sin \alpha + \cos \delta \sin \theta \cos \alpha) + \\ &+ Z(\sin \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \theta + \cos \delta \cos \theta). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В случае неподвижного закрепления трех феррозондов в теле скважинного снаряда измеряются проекции магнитного поля Земли согласно уравнениям (4). Имеется три уравнения с тремя неизвестными α, θ, φ . Решим систему уравнений (4) относительно азимута α . Для этого матричное выражение (1), соответствующее исходной системе (4), последовательно слева умножим на обратные матрицы $A_{\varphi}^{-1}, A_{\theta}^{-1}$, которые для ортогональных матриц являются транспонированными.

$$A_{\varphi}^{-1} \cdot A_{\varphi} = E, A_{\theta}^{-1} \cdot A_{\theta} = E, \text{ получим}$$

$$A_{\alpha(3)} T_R = A_{\theta}^T A_{\varphi}^T T_R, \quad (7)$$

или в скалярном виде с учетом того факта, что модули вектора \vec{T} в исходной R и проектируемой системе координат R_3 равны:

$$\left. \begin{aligned} H \cos \alpha &= T_{X3} \cos \varphi \cos \theta - T_{Y3} \sin \varphi \cos \theta + T_{Z3} \sin \theta, \\ -H \sin \alpha &= T_{X3} \sin \varphi + T_{Y3} \cos \varphi, \\ Z &= (T_{X3} \cos \varphi + T_{Y3} \sin \varphi) \sin \theta + T_{Z3} \cos \theta, \\ T_{X3}^2 + T_{Y3}^2 + T_{Z3}^2 &= Z^2 + H^2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Так как обычно измеряемые углы изменяются в пределах $0 \leq \alpha, \varphi \leq 360^\circ$ и $0 \leq \theta \leq 180^\circ$, то из уравнений (8) их однозначно определить нельзя. Но и визирный угол φ и зенитный угол θ могут быть определены с помощью датчиков кривизны. Тогда при известных θ и φ определяем α :

$$\sin \alpha = -\frac{T_{X3} \sin \varphi + T_{Y3} \cos \varphi}{H}, \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \frac{T_{X3} \cos \varphi - T_{Y3} \sin \varphi}{H \sin \theta} + \frac{Z}{H}. \quad (10)$$

Действительная величина угла азимута устанавливается после исследования сочетания знаков функций $\sin \alpha, \cos \alpha$.

Рассмотрим системы уравнений (5), (6).

$A_{\beta(3)}^T \cdot A_{\varphi(3)} = A_{(\varphi-\beta)(3)}$, так как происходит вращение вокруг оси Oz в противоположные стороны. Если считать, что рамка устанавливается в плоскость наклона с некоторой ошибкой

$$\Delta\beta = \varphi - \beta, \quad A_{\Delta\beta(3)} = \begin{vmatrix} \cos \Delta\beta & \sin \Delta\beta & 0 \\ -\sin \Delta\beta & \cos \Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \text{то проекции вектора } \vec{T} \text{ МПЗ на оси}$$

чувствительности $Ox_4y_4z_4$ в скалярном виде запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{X4} &= H(\cos \Delta\beta \cos \theta \cos \alpha - \sin \Delta\beta \sin \alpha) - Z \cos \Delta\beta \sin \theta \\ T_{Y4} &= H(-\sin \Delta\beta \cos \theta \cos \alpha - \cos \Delta\beta \sin \alpha) + Z \sin \Delta\beta \sin \theta \\ T_{Z4} &= H \sin \theta \cos \alpha + Z \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Выражение (11) есть математическая модель ИП, учитывающая инструментальные погрешности устройства от неточной установки наружной карданной рамки в плоскость наклона.

Считаем, что $\varphi - \beta = 0$ иначе $\varphi = \beta$ – наружная рамка точно устанавливается в плоскость наклона, тогда

$$A_{(\varphi-\beta)(3)} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi - \beta) & \sin(\varphi - \beta) & 0 \\ -\sin(\varphi - \beta) & \cos(\varphi - \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad A_{(\varphi-\beta)(3)} = E$$

и уравнение (1) примет вид:

$$\vec{T}_{R5} = A_{\delta(2)}^T A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \vec{T}_R. \quad (12)$$

Системы уравнений (2), (3) переписутся

$$\left. \begin{aligned} T_{X4} &= H \cos \theta \cos \alpha - Z \sin \theta, \\ T_{Y4} &= -H \sin \alpha, \\ T_{Z4} &= H \sin \theta \cos \alpha + Z \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{X5} &= H \cos \alpha \cos(\delta - \theta) + Z \sin(\theta - \delta), \\ T_{Y5} &= -H \sin \alpha, \\ T_{Z5} &= H \cos \alpha \sin(\delta - \theta) + Z \cos(\delta - \theta). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Если считать, что площадка точно устанавливается в горизонтальную плоскость $\delta = \theta$, то $A_{\delta(2)}^T \cdot A_{\theta(2)} = A_{(\theta-\delta)(2)}$

$$A_{(\theta-\delta)(2)} = \begin{vmatrix} \cos(\theta-\delta) & 0 & \sin(\theta-\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta-\delta) & 0 & \cos(\theta-\delta) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, A_{(\theta-\delta)(2)} = E.$$

Исходная матрица еще больше упрощается: $\vec{T}_{R5} = A_{\alpha(3)} \vec{T}_R$ или в скалярном виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{X5} &= H \cos \alpha, \\ T_{Y5} &= -H \sin \alpha, \\ T_{Z5} &= Z. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Азимут определяется следующим образом:

$$\cos \alpha = \frac{T_{X5}}{H}, \quad (16)$$

$$\sin \alpha = -\frac{T_{Y5}}{H}, \quad (17)$$

откуда $\alpha = \arctg\left(-\frac{T_{Y5}}{T_{X5}}\right).$

Третье уравнение системы (15) не несет информации о пространственном положении скважины и может быть исключено из рассмотрения. Таким образом, третий феррозонд, ось чувствительности которого параллельна оси Oz , нет смысла использовать при инклинометрических измерениях.

Азимут α однозначно определяется в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ после исследования сочетания знаков функций $\sin \alpha, \cos \alpha$. Система уравнений (15) определяет проекции \vec{T} МПЗ на оси чувствительности трех феррозондов, установленных на горизонтируемой площадке.

Система уравнений (13) определяет проекции \vec{T} МПЗ на оси чувствительности трех феррозондов, закрепленных в наружной рамке, которая устанавливается в плоскость наклона. Третьи уравнения системы (2) и (3) одинаковы. Это свидетельствует о том, что феррозонд, ось чувствительности которого параллельна оси вращения рамки, не имеет преимуществ перед таким же феррозондом, который неподвижно закреплен в теле скважинного снаряда.

Если $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, то информации, поступающей с трех феррозондов, достаточно для однозначного определения азимута α и зенитного угла θ :

$$\sin \alpha = -\frac{T_{Y4}}{H} \quad (18)$$

$$\cos \alpha = \frac{T_{X4} \cos \theta + T_{Z4} \sin \theta}{H}, \quad (19)$$

$$-Z = T_{X4} \sin \theta - T_{Z4} \cos \theta. \quad (20)$$

Если же зенитный угол θ измерять специальным датчиком, то α может быть определен по информации, поступающей с феррозондов, которые расположены в рамке и жестко закреплены в корпусе ИП:

$$\sin \alpha = -\frac{T_{Y4}}{H}, \quad \cos \alpha = \frac{T_{X4} - Z \cos \theta}{H \sin \theta}.$$

Уравнения (17) и (18) совпадают, поэтому второй феррозонд можно установить не на горизонтируемой площадке, а на наружной рамке параллельно оси вращения площадки.

Таким образом, получены следующие результаты:

- при $0 \leq \theta \leq 90^\circ, 0 \leq \alpha, \varphi \leq 360^\circ$ магнитный азимут α и зенитный угол θ могут быть однозначно определены по показаниям с трех стержневых феррозондов, один из которых расположен осью чувствительности параллельно продольной оси ИП, а два других расположены на горизонтируемой площадке;

- если феррозонды жестко закреплены в скважинном снаряде, то зенитный угол θ и визирный угол φ необходимо дополнительно определять специальными датчиками кривизны;
- для упрощения вычислений угол азимута можно определять по сигналам, снимаемым с двух феррозондов, расположенных на горизонтируемой площадке, и зенитный угол – специальным датчиком наклона;
- определены оптимальные соотношения для определения углов ориентации, что позволяет упростить вычислительный процесс в 4 – 5 раз.

Выводы. Разработана математическая модель ИП на основе стержневых феррозондовых преобразователей, основанная на использовании метода Денавита – Хартенберга, которая, в сравнении с известными, позволяет повысить эффективность определения параметров искривления скважины за счет упрощения вычислительного процесса в 4 – 5 раз.

Установлено, что использование в качестве чувствительных элементов ИП однотипных малогабаритных феррозондовых преобразователей позволяет уменьшить диаметр скважинного снаряда, а также создавать виброустойчивые преобразователи азимута, зенитного и визирного углов и значительно расширить диапазон рабочих температур.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетика полей [Электронный ресурс] // Корреспондент. – 2013. – № 1. – С 41. Режим доступа к журналу : <http://www.korrespondent.net/business/138698>.
2. Увеличение добычи газа на шельфе Черного моря станет еще одним шагом на пути энергонезависимости нашей страны [Электронный ресурс] // Факты. – 05.12.2012. – Название с титул. экрана.
3. Энергетика Украины [Электронный ресурс] : по данным Министерства топлива и энергетики Украины // Источник: EA Energy. – 2011. Режим доступа: <http://uaenergy.com.ua>.
4. Первый буровой портал [Электронный ресурс] / Евгений Мочалов // НефтеРынок. – Режим доступа: <http://www.first-drilling.com.ua/technologies/language/ru>.
5. **Грачев Ю.В.** Автоматический контроль в скважине при бурении и эксплуатации / Ю. В. Грачев, В. Н. Варламов. – М. : Недра, 1968. – 211 с.
6. **Мелик-Шахназаров А. М.** Приборы и средства автоматического контроля в нефтяной и газовой промышленности / А. М. Мелик-Шахназаров, Т. М. Алиев. – М. : Недра, 1964. – 272 с.
7. **Сметанин А. Г.** Измерение траектории ствола скважины и забойное ориентирование отклонителя / А. Г. Сметанин, В. Г. Чепелев, В. В. Голованов // Нефтяное хозяйство. – 1973. – № 5. – С. 15 – 18.
8. **Ковшов Г. Н.** Контроль траектории скважины в процессе бурения автономным инклинометром в условиях Западной Сибири / Г. Н. Ковшов и др. // Геофизические исследования нефтяных скважин Западной Сибири. – ВНИИНПГ, 1983. – Вып. № 13. – С. 30 – 36.
9. Многоканальная инклинометрическая система для исследования скважин в процессе бурения А.с. 595500 СССР, МКИЗ В20К 10/00 / А. Х. Сираев, Г. Н. Ковшов, А. Г. Хайров, А. А. Молчанов. (СССР) – № 2574421/14-02; заявл. 14. 10. 75; опубл. 10. 04. 78, Бюл. № 8.
10. Прибор для определения кривизны скважины и направления отклонителя А.с. 402640 СССР МКИЗ В 21 J 08/00 / Г. Н. Ковшов, А. Г. Имамудинов, А. А. Молчанов, А. Х. Сираев, Р. И. Алимбеков (СССР).–№ 4392610/14–01; заявл. 23. 04. 71; опубл. 19. 03. 73, Бюл. № 42.
11. Геофизическая аппаратура : сб. науч. ст. / Научн. ред. А. В. Матвеев и др. – Ленинград : Недра, 1980. – 224 с.
12. **Ковшов Г. Н.** Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертнов. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2001. – 228 с.
13. **Гельман М. М.** Преобразователи напряжения в кодированный временной интервал / М. М. Гельман. – М. : Энергия, 1970. – 80 с.
14. Способ и устройство преобразования сигналов от датчиков индуктивного и резисторного типов. Патент 2168728 Российская Федерация МПК7 G 01 R 27/02 / В. И. Смирнов; заявитель и патентообладатель Смирнов Виталий Иванович. – № 99126361/09; Заявлено 14. 12. 99; Опубл. 10. 06. 01, Бюл. № 16. – 5 с.

SUMMARY

One of the directions of increase in oil and gas production is creation of modern information and measuring systems of drilling. The Specialized Computer System (SCS) of orientation of the boring instrument is one of subsystems and carries out the following functions: on the basis of deep information on technological parameters of a driving sets the maximum speed of movement of a face on a design trajectory, ensures safety and quality of drilling operations. SCS of orientation of the boring tool on the basis of modern equipment has to provide a production intensification, improvement of quality of production and decrease in product cost.

The article is devoted to working out of methods and ways of transformation of parameters of a well curvature in specialized computer system (SCS) of orientation of the boring machine of creation of mathematical models of primary converters taking into account errors from destabilizing factors with preliminary mathematical processing of the measuring information.

Inclinometers are still applied to measurement of a magnetic azimuth, an anti-aircraft tilt angle of a well with a magnetic needle now. In designs of modern converters as the sensor of an azimuth ferroprobes are used. With use of ferroprobes it is possible to define not only an azimuth, but also an anti-aircraft corner. The most perspective scheme of use of ferroprobes is the scheme with rigidly fixed converters.

Use as sensitive elements the ferroprobes of converters allows to reduce diameter of a borehole shell to 38 – 40 mm. As ferroprobes converters aren't subject to influence of vibrations, on their basis creation of vibration-proof converters of anti-aircraft and vizirny corners is possible. Lack of electronics allows to expand the range of working temperatures considerably.

Thus, creation of converters on the basis of same the ferroprobes of sensors, is an actual technical task.

The mathematical model of an inclinometer on the basis of rod the ferroprobes of converters who, in comparison with known, allows to increase efficiency of determination of parameters of a curvature of a well due to simplification of computing process by 4 – 5 times is developed.

REFERENCES

1. Enerhetyka poley [Elektronnyy resurs] // Korespondent. – 2013. – № 1. – S 41. Rezhym dostupa k zhurnalnyy : <http://www.korrespondent.net/business/138698>.
2. Uvelychenye dobuchy haza na shel'fe Chernoho morya stanet eshche odnym shahom na puty enerhonezavysymosty nashey stranu [Elektronnyy resurs] // Faktu. – 05.12.2012. – Nazvanye s tytul. ekrana.
3. Enerhetyka Ukraynu [Elektronnyy resurs] : po dannum Mynysterstva toplyva y enerhetyky Ukraynu // Ystochnyk: EA Energy. – 2011. Rezhym dostupa: <http://uaenergy.com.ua>.
4. Pervuy burovoy portal [Elektronnyy resurs] / Evhenyy Mochalov // NefteRunok. – Rezhym dostupa: <http://www.first-drilling.com.ua/technologies/language/ru>.
5. Hrachev Yu.V. Avtomatycheskyy kontrol' v skvazhyne pry burenyy y ekspluatatsyy / Yu. V. Hrachev, V. N. Varlamov. – M. : Nedra, 1968. – 211 s.
6. Melyk-Shakhnazarov A. M. Pryboru y sredstva avtomatycheskoho kontrolya v neftyanoy y hazovoy promeshlennosty / A. M. Melyk-Shakhnazarov, T. M. Alyev. – M. : Nedra, 1964. – 272 s.
7. Smetanyn A. H. Yzmerenye traektoryy stvola skvazhyny y zaboynoe oryentirovaniye otklonytelya / A. H. Smetanyn, V. H. Chepelev, V. V. Holovanov // Neftyanoe khozyaystvo. – 1973. – № 5. – S. 15 – 18.
8. Kovshov H. N. Kontrol' traektoryy skvazhynu v protsesse burenyya avtonomnum ynklynometrom v uslovyakh Zapadnoy Sybyry / H. N. Kovshov y dr. // Heofyzycheskiye yssledovaniya neftyanukh skvazhyn Zapadnoy Sybyry. – VNYYNPH, 1983. – Vup. №13. – S. 30 – 36.
9. Mnokanal'naya ynklynometrycheskaya sistema dlya yssledovaniya skvazhyn v protsesse burenyya A.s. 595500 SSSR, MKY3 B20K 10/00 / A. Kh. Syraev, H. N. Kovshov, A. H. Khayrov, A. A. Molchanov. (SSSR) – № 2574421/14-02; zayavl. 14. 10. 75; opubl. 10. 04. 78, Byul. № 8.
10. Prybor dlya opredeleniya kryvlyznu skvazhynu y napravleniya otklonytelya A.s. 402640 SSSR MKY3 V 21 J 08/00 / H. N. Kovshov, A. H. Ymamutdynov, A. A. Molchanov, A. Kh. Syraev, R. Y. Alymbekov (SSSR). – № 4392610/14-01; zayavl. 23. 04. 71; opubl. 19. 03. 73, Byul. № 42.

11. Neofyzycheskaya apparatura: sb. nauch. st. / Nauchn. red. A. V. Matveev y dr. – Lenynhrad : Nedra, 1980. – 224 s.
12. Kovshov H. N. Pribory kontrolya prostranstvennoy oryentatsyy skvazhyn pry burenyy / H. N. Kovshov, H. Yu. Kolovertnov. – Ufa : Yzd-vo UHNTU, 2001. – 228 s.
13. Hel'man M. M. Preobrazovately napryazhenyya v kodyrovannuy vremennoy ynterval / M. M. Hel'man. – M. : Enerhyya, 1970. – 80 s.
14. Sposob y ustroystvo preobrazovaniya syhnalov ot datchykov ynduktyvnoho y rezystornoho tyrov Patent 2168728 Rossyyskaya Federatsyya MPK7 G 01 R 27/02 / V. Y. Smyrnov; zayavitel' y patentoobladatel' Smyrnov Vyталyy Yvanovych. – № 99126361/09; Zayavleno 14. 12. 99; Opubl. 10. 06. 01, Byul. № 16. – 5 s.

УДК 624.131:624.042:624.154

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВАНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА ЛЁССОВЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ ПРИ ЗАМАЧИВАНИИ ПРОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ СНИЗУ ВВЕРХ (ПОДТОПЛЕНИЕ ТЕРРИТОРИЙ)

А.Н. Моторный, магистр, с.н.с.; Н.А. Моторный, к.т.н., доц.

Ключевые слова: подтопление территории; силы отрицательного трения P_n ; зона распределения сил трения на боковую поверхность; анизотропия влагопереноса; стрела арки

Введение. Развитие нормативных документов по свайным фундаментам (СНиП II-Б.5-67*; СНиП II.17-77; СНиП 2.02.03-85 и действующий сегодня ДБН В.2.1-10-2009.Зміна 1) указывает на особый подход к вопросам НДС оснований свайных фундаментов в обычных аллювиально-делювиальных грунтовых отложениях. СНиП II-Б.5-67*, на заре формирования нормативных документов по расчету и проектированию свайных фундаментов не освещает вопросы проектирования свайных фундаментов на лессовых просадочных грунтах; СНиП II.17-77 как особый фактор выделяет отдельный раздел по проектированию свайных фундаментов в особых грунтовых условиях – на просадочных грунтах, где, в частности, рассматриваются вопросы учета сил отрицательного трения на боковую поверхность свай при проявлении просадки просадочной толщи для площадок, относящихся к второму типу грунтовых условий по просадочности. При этом предлагалось силу отрицательного трения грунта при просадке P_n – вычислять по значениям расчетного сопротивления i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи при показателе консистенции I_L , соответствующего полному водонасыщению лёссового грунта: $f_i = f_{isat}$; $R_n = U \sum f_{isl}$.

Следует учесть, что несущая способность сваи по грунту вычислялась по формуле:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{CR} \times R \times A + U \sum \gamma_{cf} \times f_i \times h_i);$$

причем f_i – силы трения грунта на боковую поверхность ствола сваи принимались по таблицу 2 СНиП II.17-77 при полном водонасыщении грунта f_{isat} . Тогда несущая способность сваи с учетом просадочных свойств грунта запишется выражением

$$F_d = (\gamma_{CR} \times R \times A + U \sum f_{isat} h_i) - \sum f_{isat} \times h_{isl} \times U$$

и после простых преобразований получается несущая способность сваи:

$$F_{dsl} = \gamma_{CR} \times R \times A + U \sum f_{isat} (h - h_{sl}) = (\gamma_{CR} \times R \times A + U \sum f_{isat} \times h_i),$$

т.е. силы трения грунта на боковой поверхности сваи учитываются только в пределах толщины слоя непросадочного грунта, в который заглубляется нижний конец сваи (h_i).

После неудачного проектирования и воплощения проекта в натуре на территории сложенной просадочными грунтами, с мощностью просадочной толщи $18 > h_{sl} > 26 \div 28$ м (проектная организация не имела опыта проектирования тяжелых промышленных зданий на площадках, сложенных лёссовыми просадочными грунтами второго типа грунтовых условий по просадочности) и проявлении, при стечении экстремальных ситуаций, разрушительных просадочных деформаций свайных фундаментов, законодатель нормативных документов по строительству «ГОССТРОЙ СССР» и исполнитель ВНИИОСП им. Герсеванова без теоретических и практических обоснований «откорректировали» формулу для определения сил отрицательного трения грунта на боковую поверхность сваи в виде: $P_n = U \sum_0^{h_{sl}} \tau_i \square h_i$, при комментарии: τ_i – расчетное сопротивление, Кпа, определяемое до глубины $h = 6,0$ м по формуле: $\tau_i = \xi \square \sigma_{zg} \square tg \varphi_I + C_I$, которая