

Моделювання бурильної колони під час буріння свердловин із можливим викривленням її траєкторії

© П.І. Огородніков
д-р техн.наук
ogorodnikov@mail.ru
МНТУ

В.М. Світлицький
д-р техн. наук
svetlitsky@i.ua
ТОВ «Нафтогазовий центр»

О.О. Іванків
канд.техн.наук
43yalo@gmail.com
ТОВ «Актуальні нафтогазові технології»

А.Я. Польовий
polevoy_a_@ukr.net
ПрАТ «Нафтогазвидобування» «ДТЕК»

Розглянуто коливання колони бурильних труб із прямолінійною віссю постійного або змінного по довжині перерізу в умовах викривлення її траєкторії. Показано, що амплітуда згинальних коливань підсилюється за рахунок відцентрових сил під час обертання колони (роторне буріння).

Ключові слова: моделювання, бурильна колона, буріння, свердловина, викривлення траєкторії.

Рассмотрены колебания колонны бурильных труб с прямолинейной осью постоянно-го или переменного по длине сечения в условиях искривления ее траектории. Показано, что амплитуда изгибающих колебаний усиливается за счет центробежных сил при вращении колонны (роторное бурение).

Ключевые слова: моделирование, бурильная колонна, бурение, скважина, искривление траектории.

Vibrations of drill string having linear axis of uniform- or variable-length cross section in the presence of deviation of the hole path have been considered. The amplitude of the bending vibrations is shown to be amplified by centrifugal force during the string rotation (rotary drilling).

Key words: modelling, drill string, well boring, borehole, deviation of the hole path.

УДК 276.24.053

Основними причинами викривлення вертикальних свердловин є нерівномірна виробка площі вибою у різних напрямках, що призводить до зміщення вибою, а також нерівномірне руйнування стінок похилих свердловин, яке спричиняється дією сили тяжіння бурильного інструмента.

Можна зробити висновок, що першопрчиною викривлення вертикальної свердловини є, головним чином, геолого-технічні умови буріння [1].

Інтенсивність викривлення стовбура у цьому інтервалі можна визначити із такого виразу [1]:

$$i = \frac{\Phi}{l_k}, \quad (1)$$

де Φ – кут на інтервалі стовбура свердловини, $\Phi = \frac{l_i F}{\mu_k}$; l_k – довжина інтервалу; μ_k – середнє ефективне викривлення на інтервалі l_k ; F – узагальнений силовий параметр.

Бурильну колону (БК) як гнучку механічну систему у багатьох випадках доцільно моделювати у вигляді жорсткої струни (дроту), що пов'язано з тим, що вона під дією осьової сили (за значної довжини) має власну поперечну жорсткість, набагато меншу за повздовжню [2–4]. Мала жорсткість на згин бурильної колони дає можливість набувати певної форми профілю свердловини з набуттям кривизни в процесі буріння. Таким чином, бурильну колону можна моделювати як пружний стрижень за її малої довжини та як жорстку струну за значних довжин (глибоке буріння).

Розглянемо коливання колони бурильних труб із прямолінійною віссю постійного або змінного по довжині перерізу. Масу колони вважаємо розподіленою або змінною по довжині за заданим законом.

Будемо розглядати коливання з малою амплітудою, за яких зберігається пропорційність між силами пружності і деформаціями БК та її елементів.

Для подальшого аналізу складемо диференціальне рівняння коливань ділянки бурильної колони (рис. 1). Прямолінійну вісь БК приймемо у стані спокою за вісь OZ. Переміщення у будь-якій точці на осі колони визначається координатою Z, а поворот перерізу – кутом $\theta = \frac{dz}{dy}$.

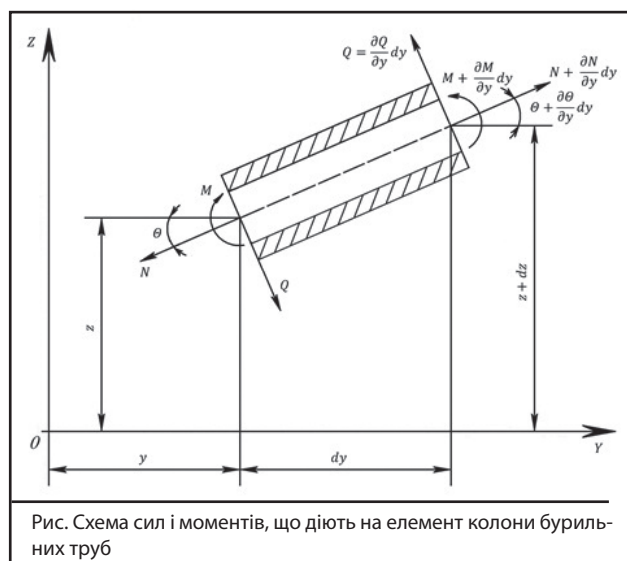


Рис. Схема сил і моментів, що діють на елемент колони бурильних труб

Уведемо позначення: $m(z)$ – розподілена маса бурильних труб; $EI(z)$ – згинальна жорсткість; q – інтенсивність зовнішнього навантаження (інерція); Θ – інтенсивність зовнішнього моменту; Q – перерізувальна сила; M – згинальний момент; $N=T(z)$ – повздовжня сила.

Після ряду перетворень і скорочення dz та нехтуючи доданками вище другого порядку, які витікають із рис. 1, згідно з [5], можна записати:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial z} + Q + M &= 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(N\Theta) + q_y &= 0; \\ \frac{\partial N}{\partial z} + q_y &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

За малих коливань (наприклад, повздовжні коливання долота під час заглиблення вибою) повздовжні зусилля $N=T(z)$ не залежать від положення БК і визначаються вихідними граничними умовами закріплення.

Тому, розв'язавши спільно два перших рівняння, отримаємо

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} + \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(N\Theta) - q_y = 0. \quad (3)$$

Підставляючи (3) у рівняння згину $M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$, отримаємо у загальному вигляді рівняння деформації прямої лінійної БК:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial y}{\partial z} \right) - q_y = 0. \quad (4)$$

За вільних коливань навантаження q_y і M є інерційними силами і моментами маси самої бурильної колони: $q_y = -m(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T(z)$.

Нехтуючи значенням M і підставляючи значення q_y у вираз (4), отримаємо рівняння жорсткої струни (дроту):

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) - T(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + m(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Отримане рівняння аналогічне рівнянню коливань жорсткої струни (дроту) [6]. Якщо вважати, що колона труб знаходиться у розтягнутому стані під дією натягу і має власну жорсткість, то рівняння руху, згідно з [6], матиме такий вигляд:

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - ES\vartheta^2 \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (6)$$

де S – площа поперечного перерізу; ϑ – радіус інерції; ρ – густина труб колони; E – модуль пружності труб колони.

Рівняння (5) та (6) за структурою ідентичні і відрізняються тільки постійними коефіцієнтами. Рівняння (6), як і рівняння (5), описує коливання жорсткої струни (дроту). Вважаючи, що колона бурильних труб знаходиться у розтягнутому стані під дією власної ваги, її

натяг можна записати:

$$T(z) = T_0 - \rho S z; \quad m(z) = \rho S, \quad (7)$$

де T_0 – вага колони бурильних труб.

Рівняння (5) можна переписати в такому вигляді:

$$T(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - ES\vartheta^2 \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = m(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Хвильовий синусоїдальний рух у БК, як у дроті, буде розповсюджуватися під дією сил коливання промивальної рідини у тому випадку, коли $y = C e^{2\pi i(\mu x - \nu t)}$. Тоді ми отримаємо рівняння, яке буде пов'язувати частоту ν із постійною μ :

$$T(z)\mu^2 - 4\pi^2 ES\vartheta^2 \mu^4 = \rho S \nu^2. \quad (9)$$

Якщо частота дуже мала (ϑ^2 – набагато менша, ніж $T^2/16\pi^2 \rho ES^2 \vartheta^2$), то після ряду перетворень (розклад радикала у ряд за формулою бінома і залишаючи тільки перші два члени) отримаємо наближене значення:

$$\mu^2 = \rho S \nu^2 / T. \quad (10)$$

Фазова швидкість (ϑ/μ) у цьому випадку буде практично постійною $\sqrt{\frac{T}{\rho S}}$. Ця величина була б швидкістю розповсюдження будь-якої хвилі, якби колона не являла собою жорсткої струни. Фазова швидкість для бурильної колони, яка моделюється у вигляді жорсткого дроту, зростає зі збільшенням ϑ до границі $\sqrt{2\pi\vartheta} (Q \vartheta^2 / \rho)^{\frac{1}{4}}$ при високих частотах. Таке значення швидкості властиве для фазової швидкості поперечних коливань БК без натягу. Тобто БК за великих довжин хвиль подібна до струни, а за коротких – до пружного стрижня.

Висновки

Отже, за малих коливань повздовжнє зусилля не залежить від положення БК у просторі і визначається її закріпленням на кінцях.

Уздовж колони труб поперечні коливання являють собою біжучу синусоїдальну хвилю у додатковому напрямку, що є ідентичним у випадку струни. Однак існує різниця між цими двома хвилями. Під час моделювання колони у вигляді стрижня швидкість поперечних коливань залежить від їх частоти. Стрижень можна назвати диспергуючим середовищем для згинальних хвиль.

Амплітуда згинальних коливань підсилюється за рахунок відцентрових сил під час обертання колони (роторне буріння).

Критерієм впливу інерції повороту перерізу може слугувати відношення довжини півхвилі пружної лінії до діаметра бурильних труб.

Список використаних джерел

1. **Калинин С.Г.** Искривление скважин / С.Г. Калинин. – М.: Недра, 1974. – 303 с.
2. **Юнин Е.К.** Динамика глубокого бурения / Е.К. Юнин, В.К. Хегай. – М.: Недра, 2004. – 285 с.
3. **Огородников П.И.** Управление углублением скважины на базе изучения динамических процессов в бурильной колонне: дис. докт. техн. наук / Петр Иванович Огородников. – М.: МИНХ и ГП им. акад. И.М. Губкина, 1991. – 421 с.
4. **Сароян А.Е.** Бурильные колонны в глубоком бурении / А.Е. Сароян. – М.: Недра, 1979. – 229 с.
5. **Морз Ф.** Колебания и звук / Ф. Морз. – Л.: Госиздат технико-теоретической литературы, 1949. – 496 с.
6. **Самарин А.А.** Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения / А.А. Самарин. – М.: Энергия, 1979. – 286 с.