

Плоский згин бурильної колони при її стиску в горизонтальному стовбурі свердловини

Р. В. Рачкевич¹

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

¹ foxman@ukr.net

Розглянуто напружено-деформований стан бурильної колони при її стиску в горизонтальному стовбурі свердловини. Отримано функцію пружної осі бурильної колони у вигляді хвилеподібної кривої, що дозволяє вдосконалити аналітичні моделі оцінки зменшення осьової сили в залежності від форми пружної осі бурильної колони, визначення сили притиснення її до стінок свердловини і розрахунку нормальних напружень у поперечному перерізі бурильних труб.

Ключові слова: бурильна колона, напружено-деформований стан, пружна вісь, хвилеподібна форма, горизонтальна ділянка свердловини.

Бурильна колона є довгомірним об'єктом. Її осьові розміри набагато більші за радіальні, а експлуатаційні навантаження мають дуже широкий діапазон. За таких обставин колона бурильних труб зазнає деформацій навіть у вертикальних свердловинах. Цілком очевидно, що під час похило-скерованого та горизонтального буріння умови її роботи тільки ускладнюються. З'являється цілий ряд чинників, які як окремо, так і сумісно призводять до значних осьових та поперечних деформацій бурильної колони.

З іншого боку, деформація бурильної колони є визначальним чинником при оцінці її як статичної, так і втомної міцності, при розрахунку відхильної сили на долоті та зусилля притиснення колони до стінок стовбура свердловини тощо.

Відтак проблема аналізу напружено-деформованого стану колони бурильних труб залишається актуальною та привертає увагу багатьох науковців. У загальному шляхи її вирішення наводяться в роботі [1], а огляд основних напрямів та аспектів, на яких зосереджують увагу науковці, можна знайти в [2, 3]. Аналіз цих літературних джерел свідчить, що вдосконалення потребують аналітичні моделі визначення напружено-деформованого стану бурильної колони, що зазнає стиску у горизонтальному стовбурі свердловини.

Дану задачу розглянуто в роботі [4]. Для аналітичного моделювання колони використано розрахункову схему поздовжньо-поперечного згину вагомої балки. Відзначено, що за деякої величини стискної сили бурильна колона, що лежить на нижній стінці свердловини, втратить стійкість, вигнеться та торкнеться верхньої, протилежної стінки стовбура свердловини. У [4] наведено формулу для визначення довжини ділянки відриву. Проте, реакція, яка виникає в місці контакту з верхньою частиною стінки свердловини, та деформація при подальшому збільшенні стискної сили не розглядаються.

Раніше [5] на основі запропонованого в [6] методу досліджувалася стійкість стисненої бурильної колони в горизонтальному стовбурі свердловини. Метод дає можливість проаналізувати напружено-деформований стан труб за будь-якої величини стискної сили та визначити реакцію стінок свердловини без врахування власної ваги колони.

У даній роботі розглянуто розв'язок задачі, яка подібна до наведеної в [5], але з урахуванням власної ваги бурильної колони.

Нехай осьова сила S , що стискає бурильну колонну в горизонтальному стовбурі свердловини, менша за деякі значення S_{c1} та S_{c2} . У такому випадку пружна вісь колонни зберігатиме прямолінійну форму. Деформацію бурильної колонни при подальшому збільшенні стискної сили, тобто при $S_{c1} < S < S_{c2}$, розглянуто в роботі [4]. У випадку виконання умови $S_{c2} < S$ бурильна колонна зазнаватиме хвилеподібної деформації, одночасно контактуючи з нижньою та верхньою стінками стовбура свердловини (рис. 1).

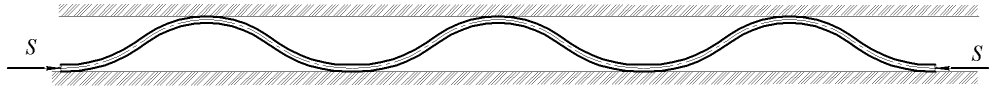


Рис. 1. Хвилеподібна форма пружної осі бурильної колонни в горизонтальному стовбурі свердловини.

Оскільки можливість зміни осової сили вздовж хвилеподібної ділянки не враховується, довжини хвиль та самі хвилі і півхвилі будуть однаковими.

Розглянемо розрахункову схему, представлену на рис. 2, де, як зазначалося вище, S – осьова стискна сила; $R_1 = R_3 = R_5 = \dots = R_n$ – реакції нижньої частини стінки свердловини; $R_2 = R_4 = \dots = R_{n-1}$ – реакції верхньої частини стінки свердловини; l – довжина півхвилі; Δ – максимально допустимий прогин пружної осі; $y_1(z_1)$, $y_2(z_2)$, $y_3(z_3)$, ..., $y_n(z_n)$ – функції пружних осей півхвиль.

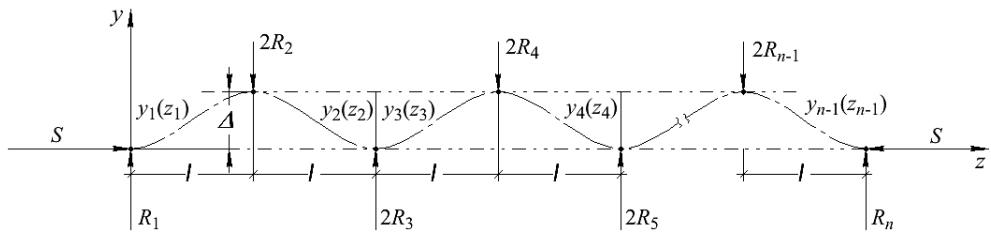


Рис. 2. Розрахункова схема.

При переході через $m-1$ точки контакту ($m = 2, 3, 4, \dots, n-1$) колонни з нижньою чи верхньою стінкою свердловини перерізуюча сила буде стрибкоподібно змінювати знак із $\pm R_m$ на $-/\pm R_m$. У лівій та правій точках відриву ($m = 1$ або $m = n$) відбудеться стрибок від нуля до R_1 або від $R_n = R_1$ до нуля відповідно.

Для більш зручного представлення результатів розрахунків розглянемо одночасно дві хвилі (згідно з рис. 2 першу та другу). Система диференціальних рівнянь для опису пружної осі набуде вигляду

$$\begin{cases} EI_x y_1^{IV}(z_1) + S y_1''(z_1) = -q; \\ EI_x y_2^{IV}(z_2) + S y_2''(z_2) = -q; \\ EI_x y_3^{IV}(z_3) + S y_3''(z_3) = -q; \\ EI_x y_4^{IV}(z_4) + S y_4''(z_4) = -q, \end{cases} \quad (1)$$

де E , I_x – модуль пружності першого роду матеріалу бурильних труб і момент інерції їх поперечного перерізу; q – приведена вага одиниці довжини бурильних труб.

Розв'язками системи (1) будуть наступні функції:

$$y_m(z)_m = -C_{m1} \frac{EI_x}{S} \sin\left(\sqrt{\frac{S}{EI_x}} z_m\right) - C_{m2} \frac{EI_x}{S} \cos\left(\sqrt{\frac{S}{EI_x}} z_m\right) - \frac{qz_m^2}{2S} + C_{m3} z_m + C_{m4}, \quad m = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

Змінні інтегрування можна визначити з системи алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(0) = 0; \\ y_1'(0) = 0; \\ y_1(l) = \Delta; \\ y_2(l) = \Delta; \\ y_1'(l) = y_2'(l) = 0; \\ y_2(2l) = 0; \\ y_3(2l) = 0; \\ y_2'(2l) = y_3'(2l) = 0; \\ y_3(3l) = \Delta; \\ y_4(3l) = \Delta; \\ y_3'(3l) = y_4'(3l) = 0; \\ y_4(4l) = 0; \\ y_4'(4l) = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Величина Δ (рис. 2) розраховується за формулою

$$\Delta = D_b - d,$$

де D_b – діаметр свердловини; d – зовнішній діаметр бурильної колони.

Довжину l визначимо, виходячи з критерію мінімуму потенціальної енергії згину [7]:

$$U = \sum_{m=1}^4 \int_0^l \frac{M_m^2(z_m)}{2EI_x} dz_m, \quad (4)$$

де U – потенціальна енергія згину; $M_m(z_m)$ – функції зміни згинального моменту.

Реакції згідно з рис. 2 будуть:

$$R_1 = EI_x y_1'''(0); \quad R_2 = EI_x y_2'''(l); \quad R_3 = EI_x y_3'''(2l); \quad R_4 = EI_x y_4'''(3l). \quad (5)$$

Тільки у випадку, якщо $R_1 > 0$, $R_3 > 0$, а $R_2 < 0$, $R_4 < 0$, відбувається контакт бурильної колони з верхньою частиною стінки свердловини. Тоді формула для визначення нормальних напружень згину в поперечному перерізі бурильних труб матиме вигляд

$$\sigma_m(z_m) = \frac{M_m(z_m)d}{2I_x}. \quad (6)$$

Проілюструємо розрахунок на прикладі. Нехай легкосплавні бурильні труби ЛБТПН зовнішнім діаметром 103 мм, внутрішнім 85 мм і довжиною 2200 м у горизонтальній ділянці свердловини діаметром 152,4 мм стискаються із силою 119141 Н [8].

Розрахунок за формулами (1)–(6) дає наступні результати: $l = 6,5$ м; $R_1 = 975,6$ Н; $R_2 = -389,6$ Н; $R_3 = 975,6$ Н і т.д. Як бачимо, знаки, а отже, і напрямки реакцій вказують на те, що деформація труб має хвилеподібну форму (рис. 2). При цьому максимальна величина нормального напруження згину в поперечному перерізі бурильних труб становить 23,7 МПа.

Можливі значення довжин хвиль та відповідні їм нормальні напруження згину для колони ЛБТПН за інших значень стискної сили наведено в таблиці.

Результати розрахунку довжини хвилі та нормального напруження згину в залежності від осової стискної сили

Осова стискна сила, кН	Довжина хвилі, м	Нормальне напруження згину, МПа
250	6	97
200	11	24
150	12	24
100	14	24
50	Не утвориться	0

Розглянемо зменшення осової сили від тертя колони об стінки свердловини в залежності від форми пружної осі. Згідно з розрахунком, довжина півхвилі становить 6,5 м, тобто довжина однієї хвилі – 13 м. Враховуючи, що довжина горизонтальної ділянки 2200 м, можемо говорити про утворення 169 хвиль ($k = 169$). Відтак маємо 169 реакцій з верхньою частиною стінки свердловини та 170 із нижньою (рис. 2). Отже, силу тертя, або, іншими словами, силу опору переміщенню труб у свердловині можна визначити за формулою

$$F_{fc} = 2\mu k(|R_1| + |R_2|). \quad (7)$$

У результаті розрахунку за рівністю (7) отримаємо $F_{fc} = 46337,9$ Н. Якби пружна вісь колони такої ж довжини (2200 м) була прямолінійною, то для визначення сили тертя необхідно використати формулу

$$F_{fc} = \mu ql, \quad (8)$$

згідно з якою сила тертя $F_{fc} = 39670,4$ Н. Різниця між отриманими значеннями складає 17%.

Якщо, наприклад, величину F_{fc} для стискної сили 150 кН розрахувати за рівністю (7), отримаємо 71881,2 Н, що на 81% більше за F_{fc} , за формулою (8). Як бачимо, в діапазон зміни осового навантаження на долото входять величини, за яких пружна вісь бурильної колони може залишатися як прямолінійною, так і набувати хвилеподібної форми. В іншому випадку, окрім нормальних напружень стиску будуть виникати нормальні напруження згину, які можуть сягати 97 МПа (таблиця), тому вони повинні враховуватися при аналізі як статичної, так і втомної міцності бурильних труб.

З іншого боку, форма пружної осі колони суттєво впливає на величину сили опору переміщенню труб у свердловині. Так, розрахунок показує, що при збільшенні осьової стискної сили труб від 50 до 150 кН форма пружної осі колони змінюється з прямолінійної на хвилеподібну і, як наслідок, сила опору переміщенню труб у свердловині зростає майже у два рази.

Дана методика є інженерним наближенням розв'язком поставленої задачі стійкості бурильної колони з постійним осьовим стиском у горизонтальній свердловині скінченної довжини. Її можливо раціоналізувати та уточнити наступним чином.

Оскільки всі півхвилі еквівалентні між собою, достатньо розглянути довільну з них, наприклад першу. Для неї будуть задовольнятися такі граничні умови:

$$y_l(0) = y_l'(0) = y_l'(l) = 0, \quad y_l(l) = \Delta, \quad (9)$$

з яких знаходяться константи C_{11} , C_{12} , C_{13} та C_{14} як функції невідомої довжини півхвилі l . Кількість півхвиль дорівнює $2k = 2[L/2l]$, де L – довжина горизонтальної ділянки свердловини, що розглядається, квадратними дужками позначено цілу частину дійсного числа. Мінімізуючи пружну потенційну енергію хвилеподібної частини колони

$$EI_x U = [L/2l] \int_0^l M_1^2(l, z_1) dz_1, \quad (10)$$

знаходимо l , а разом і їхню кількість $2k$. Зауважимо, що в правій частині (10) невідома l входить і в підінтегральний вираз, і в верхню границю інтегралу, і в передінтегральний множник, тому відшукувати мінімум U в залежності від l доведеться, швидше за все, з використанням наближених чисельних алгоритмів.

Метод (9), (10) буде більш докладно описувати поставлену задачу стійкості, тому він є предметом подальших досліджень.

Резюме

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние бурильной колонны при ее сжатии в горизонтальном стволе скважины. Получено функцию упругой оси бурильной колонны в виде волнообразной кривой, что позволяет усовершенствовать аналитические модели оценки уменьшения осевой силы в зависимости от формы упругой оси бурильной колонны, определения силы прижатия ее к стенкам скважины и расчета нормальных напряжений в поперечном сечении бурильных труб.

1. Гуляев В. И., Гайдайчук В. В., Худолій С. М. та ін. Сучасні методи теоретичного моделювання станів бурильних колон у похило-скерованих свердловинах // Нафтова і газова пром-сть. – 2009. – № 1. – С. 26 – 30.
2. Рачкевич Р. В., Артїм В. І., Козлов А. А. Визначення положення бурильної колони у криволінійному стовбурі свердловини // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 4 (25). – С. 88 – 92.
3. Рачкевич Р. В., Козлов А. А., Сенчішак В. М. та ін. Взаємодія бурильної колони зі стінками свердловини в місцях утворення жолобів та каверн // Сб. науч. тр.: Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – Вып. 13. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – С. 47 – 51.
4. Глушич В. Г. Вигин бурильної колони та вибір траєкторії буріння горизонтального бічного стовбура свердловини // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 3 (4). – С. 64 – 66.

5. *Рачкевич Р. В.* Напружено-деформований стан стисненої бурильної колони у горизонтальному стовбурі свердловини // Там же. – 2012. – № 3 (44). – С. 70 – 77.
6. *Феодосьев В. И.* Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1977. – 376 с.
7. *Сопротивление материалов.* Учеб. для вузов / Под общ. ред. Г. С. Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк., 1979. – 696 с.
8. *Басович В. С., Гельфгат М. Я.* Проектирование бурильных колонн для бурения горизонтальных скважин большой протяженности: “Бурение 2005”. – М., 2005. – 19 с.

Поступила 12. 03. 2013