

УДК 622.242:534-16

Г. М. Улитин, Ю. В. Петтик

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Крутильные удары в двухступенчатых бурильных колоннах

В статье переведены результаты исследований крутильного удара в двухступенчатых бурильных колоннах при заклинивании режущего инструмента. Исследования выполнялись для геологоразведочного бурения.

Ключевые слова: колебания, бурильная колонна, инструмент, напряжения

Бурильная колонна представляет собой сложный и ответственный элемент буровой системы, обеспечивающая проведение скважины. Поломка отдельного элемента бурильной колонны часто приводит к сложным авариям, ликвидация которых занимает длительное время, что приводит к значительным непроизводительным затратам.

На напряженно-деформированное состояние бурильной колонны оказывают влияние многие факторы. Так, например, статические и циклические нагрузки, определение которых не вызывает особых трудностей подробно рассмотрены в ряде работ [1, 2]. При этом, расчет и учет динамических процессов, в частности крутильных колебаний в двухступенчатых бурильных колоннах из-за трудностей математического и вычислительного характера у многих исследователей описан лишь качественно [1].

При бурении скважин источником крутильных колебаний и ударов в колонне является не только неравномерность их вращения из-за изменения момента сопротивления со стороны забоя, а также заклинивание инструмента осыпями, шламом и др.

Крутильные удары в однородных бурильных колоннах изучены в работах [3, 4]. Собственные крутильные колебания для двухступенчатых колонн рассмотрены в работах [5].

Таким образом, эксплуатация буровых установок связана с динамическими процессами, протекающими в них. Крутильные колебания и ударные процессы в бурильной колонне являются одним из основных источников поломок технологического оборудования, что приводит к тяжелым авариям, а иногда, к многомесячным простоям на буровых участках. Поэтому, обстоятельное изучение динамики буровых установок является важным условием их эффективного проектирования и рациональной, безаварийной эксплуатации.

Целью настоящей работы является изучение крутильных колебаний в двухступенчатых бурильных колоннах при заклинивании режущего инструмента, как наиболее опасного явления при работе бурильных колонн.

Расчетная схема данной задачи представлена на рис. 1. Аналогично, как в работе [5], математическую модель крутильных колебаний рассмотрим отдельно на каждом участке бурильной колонны

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} = a_i^2 \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где φ_i - углы закручивания поперечных сечений i -го участка колонны; $a_i^2 = \frac{G_i J_{p,i}}{J_{0,i}}$, G_i -

модуль упругости второго рода; $J_{p,i}$ - полярный момент инерции площади поперечного сечения; $J_{0,i}$ - момент инерции массы единичной длины участка системы относительно продольной оси вращения.

Воспользуемся условиями сопряжения двух участков колонны

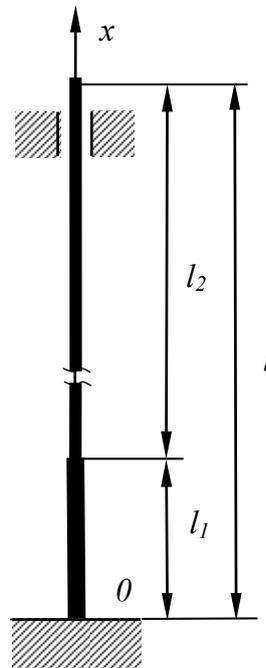


Рис. 1. Расчетная схема буровой колонны

$$\begin{aligned} \varphi_1(l_1, t) &= \varphi_2(l_1, t); \\ G_1 J_{p,1} \varphi_1'(l_1, t) &= G_2 J_{p,2} \varphi_2'(l_1, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Массу режущего инструмента учитывать не будем, т. к. рассматриваем задачи о прихвате (заклинивании) режущего инструмента. Начальные условия в этом случае имеют вид

$$\varphi(x, 0) = 0, \quad \dot{\varphi}(x, 0) = \dot{\varphi}_0, \quad (3)$$

где $\dot{\varphi}_0$ - угловая скорость вращения буровой колонны, а граничные условия, в зависимости от изучаемых задач:

$$\varphi_1(0, t) = 0; \quad \varphi_2(l, t) = 0. \quad (4)$$

или

$$\varphi_1(0, t) = 0; \quad \varphi_2'(l, t) = 0. \quad (5)$$

Собственные функции граничной задачи (1), (4,5) представим в виде

$$X_n(x) = \begin{cases} A_{n,1} \cos k_{n,1}x + B_{n,1} \sin k_{n,1}x; & 0 \leq x \leq l_1; \\ A_{n,2} \cos k_{n,2}x + B_{n,2} \sin k_{n,2}x, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (6)$$

где $k_{n,i} = \frac{\omega_n}{a_i}$, $\omega_n = k_{n,1}a_1 = k_{n,2}a_2$ - собственные частоты колебаний системы, $l = l_1 + l_2$.

Если собственные функции (6) подставить в условия стыковки участков (2) и в граничные условия (4), то получим однородную линейную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов $A_{n,i}$ и $B_{n,i}$ ($i = 1, 2$)

$$\left. \begin{aligned} A_{n,1} &= 0; \\ A_{n,2} \cos k_{n,2}l + B_{n,2} \sin k_{n,2}l &= 0; \\ A_{n,1} \cos k_{n,1}l_1 + B_{n,1} \sin k_{n,1}l_1 &= A_{n,2} \cos k_{n,2}l_1 + B_{n,2} \sin k_{n,2}l_1; \\ k_{n,1} G_1 J_{p,1} (-A_{n,1} \sin k_{n,1}l_1 + B_{n,1} \cos k_{n,1}l_1) &= \\ = k_{n,2} G_2 J_{p,2} (-A_{n,2} \sin k_{n,2}l_1 + B_{n,2} \cos k_{n,2}l_1). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Систему уравнений (7) приведем к виду

$$\left. \begin{aligned} B_{n,1} \sin k_{n,2} l_1 - A_{n,2} \cos k_{n,2} l_1 - B_{n,2} \sin k_{n,2} l_1 &= 0; \\ B_{n,1} \alpha \cos k_{n,1} l_1 + A_{n,2} \sin k_{n,2} l_1 - B_{n,2} \cos k_{n,2} l_1 &= 0; \\ A_{n,2} \cos k_{n,2} l + B_{n,2} \sin k_{n,2} l &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{J_{0,1} G_1 J_{p,1}}{J_{0,2} G_2 J_{p,2}}}$.

Приравнявая определитель системы (8) к нулю, получим уравнение для определения собственных значений $\lambda_{n,i}$, которые определяют спектр собственных частот колебаний

$$\alpha \cos \lambda_n \eta \sin \lambda_n + \sin \lambda_n \eta \cos \lambda_n = 0, \quad (9)$$

где $\lambda_n = \lambda_{n,2}$, $\eta = \frac{l_1 a_2}{l_2 a_1}$.

В частности для однородной колонны ($l_1 = 0$; $l_2 = l$) следует известный случай $\sin \lambda_n = 0 \Rightarrow \lambda_n = \pi n$.

Аналогично получаем уравнение для граничных условий (5)

$$\alpha \cos \lambda_n \eta \cdot \cos \lambda_n - \sin \lambda_n \eta \cdot \sin \lambda_n = 0, \quad (10)$$

из которого следует известный случай для однородной колонны: $\lambda_n = \frac{\pi}{2} + \pi n$.

Зная собственные значения λ_n граничных задач можно легко найти собственные частоты колебаний бурильной колонны $\omega_n = \frac{\lambda_n a_2}{l_2}$.

На примере второй задачи (5) роторного способа бурения определим напряженно-деформированное состояние колонны при таком крутильном ударе. В частности такая задача решена для однородной колонны в работе [4].

Из первого начального условия (3) следует

$$\varphi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n X_n(x) \sin \omega_n t. \quad (11)$$

Из последнего уравнения системы (3) определим

$$B_{n,2} = A_{n,2} \operatorname{tg} k_{n,2} l, \text{ а из первого } B_{n,1} = A_{n,2} \frac{\cos \lambda_n}{\sin k_{n,1} l_1 \cdot \cos k_{n,2} l}.$$

Для определения коэффициентов $A_{n,2}$ применим метод Фурье с учетом, что собственные функции ортогональны с весом [5]

$$\rho(x) = \begin{cases} J_{0,1}, & 0 \leq x \leq l_1; \\ J_{0,2}, & l_1 < x \leq l, \end{cases}$$

$$X_n(x) = \begin{cases} \frac{\cos \lambda_n \sin k_{n,1} x}{\sin k_{n,1} l_1 \cdot \cos k_{n,2} l}, & 0 \leq x \leq l_1; \\ \cos k_{n,2} x + \operatorname{tg} k_{n,2} l \cdot \sin k_{n,2} x, & l_1 < x \leq l. \end{cases}$$

Получим выражение для квадрата нормы собственных функций

$$\Delta_n^2 = \int_0^l \rho(x) X_n^2(x) dx = \frac{l_2}{2\lambda_n \cos^2 k_{n,2} l} \times \left(\frac{J_{0,1} a_1 \cos^2 \lambda_n}{a_2 \sin^2 \lambda_n \eta} (\lambda_n \eta - \sin \lambda_n \eta \cdot \cos \lambda_n \eta) + J_{0,2} (\lambda_n + \cos 2k_{n,2} l_1) \times (\sin k_{n,2} l \cdot \cos k_{n,1} l - \sin k_{n,2} l_1 \cdot \cos k_{n,2} l_1) \right)$$

И тогда из второго начального условия (3) находим

$$A_{n,2} = \frac{\dot{\varphi}_0 l_2^2}{a_2 \lambda_n^2 \Delta_n^2 \cos k_{n,2} l} \left(\frac{a_1 J_{0,1} \cos \lambda_n (1 - \lambda_n \eta)}{a_2 \sin \lambda_n \eta} + J_{0,2} \sin \lambda_n \right).$$

Определим касательные напряжения, возникающие в нижней части колонны бурильных труб, в зоне соединения режущего инструмента с трубами, как наиболее опасные в технологии бурения

$$\tau = G_1 R_1 \frac{\partial \varphi(0, t)}{\partial x} = \frac{a_2 G_1 R_1}{a_1 l_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{n,2} \lambda_n \sin \lambda_n \sin \omega_n t}{\sin k_{n,1} l_1 \cos k_{n,2} l}, \quad (12)$$

где R_1, R_2 - радиусы соответствующих частей колонны.

По формуле (12) были вычислены напряжения в зависимости от безразмерного времени $\zeta = \frac{a_2 t}{l_2}$ для глубины бурения: $l = \{90, 140, 240, 340, 440, 540, 640, 840\}$ м; при бурении

станком ЗИФ 1200-МР с параметрами бурильной колонны: $G_1 = 7,69 \cdot 10^{11}$; $R_1 = 0,0495$ м; $l_1 = 40$ м; $l_2 = 240$ м; $J_{0,1} = 0,0449$ кг·м; $J_{0,2} = 3,0145 \cdot 10^{-3}$ кг·м; $\dot{\varphi}_0 = 12,576$ рад/с.

На рис. 2 приведен график развития касательных напряжений в нижней части бурильной колонны в течение 0,2 с после прихвата режущего инструмента. Напряжения определялись в сечении над инструментом при глубине бурения $l=140$ м. При этом значение максимальных касательных напряжений составило $\tau = 183,6$ МПа.

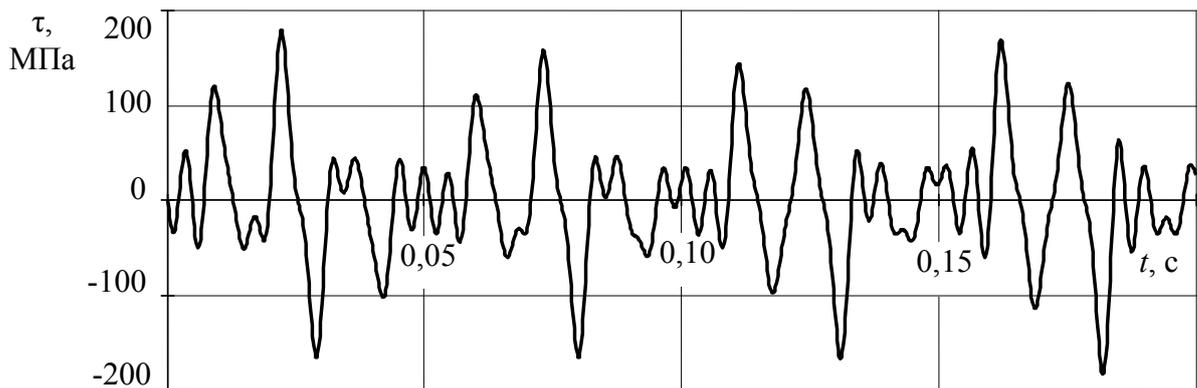


Рис. 2. Картина развития касательных напряжений в бурильной колонне после заклинивания режущего инструмента при глубине бурения $l=140$ м

Вычисленные напряжения вызваны изменением скорости вращения колонны. Для определения суммарных напряжений к ним нужно добавить напряжения, вызванные внезапным приложением момента вращения на шпинделе. Как показано в работе [6], значения таких напряжений не превосходят удвоенных значений от статических нагрузок.

Предложенная зависимость (12) позволяет определять и в дальнейшем учитывать касательные напряжения, как самые опасные при крутильных ударах двухступенчатых бурильных

колонн, и тем самым регламентировать безаварийные режимы бурения. Полученные рекомендации можно использовать при решении задач о крутильных колебаниях бурильной колонны ступенчато-переменной жесткости не только для бурения геологоразведочных скважин, но и скважин другого назначения.

Библиографический список

1. Сароян А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. – М.: Недра, 1990. – 263 с.
2. Расчет бурильных труб в геологоразведочном бурении / Эпштейн Е.Ф., Мацейчик В.И., Ивахин И.И., Асатурян А.Ш. – М.: Недра, 1979. – 160 с.
3. Шевченко Ф.Л., Улитин Г.М. О разновидностях крутильных ударов возникающих при работе буровых установок и способах их устранения // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. - Екатеринбург: УГГА. – 2001. – Вып. 24. – С.132-138.
4. Улитин Г.М., Петтик Ю.В. Крутильные колебания бурильных колонн при прихватах //Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 25, т.3 С. 240-246.
5. Улитин Г.М., Петтик Ю.В. Математическая модель ударных процессов в двухступенчатых бурильных колоннах //Вибрация в технике и технологиях. - 2007. – №3. - С. 26-29.
6. Улитин Г.М., Петтик Ю.В. Определение оптимального времени нагружения ротора крутящим моментом //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 26. – С. 124-129.

Надійшла до редколегії 20.12.2011.

Г. М. Улітін, Ю. В. Петтік

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна

Крутильні удари в двохступеневих бурильних колонах

У статті наведені результати досліджень крутильного удару у двоступінчастих бурильних колонах при заклинюванні різального інструменту. Дослідження виконувалися для геологорозвідувального бурового бурення.

Ключові слова: коливання, бурильна колона, інструмент, напруги

G. M. Ulitin, Y. V. Pettik

Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine

Torsional vibrations in two-stage drilling strings

This article contains the results of studies torsional vibrations in two-stage drilling string. Research carried out for exploration drilling.

Keywords: oscillations, drilling pipe string, the tool, the voltage