

УДК 539.3
UDC 539.3**ВПЛИВ СИЛ ТЕРТЯ НА БИФУРКАЦІЙНЕ ВИПИНАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН
В ПРЯМОЛІНІЙНИХ ПОХИЛИХ СВЕРДЛОВИНАХ***Шлюнь Н.В.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна**INFLUENCE OF FRICTION FORCES ON BIFURCATION BUCKLING
OF DRILL STRINGS IN INCLINED WELLS***Shlyun N. V.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine**ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ НА БИФУРКАЦИОННОЕ ВЫПУЧИВАНИЕ БУРИЛЬНЫХ
КОЛОН В ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ***Шлюнь Н.В.*, Национальный транспортный университет, Киев, Украина**Постановка проблеми.**

Розвиток нафтогазової промисловості та удосконалення умов буріння є одним з найактуальніших питань в нашому столітті. Основною проблемою, що супроводжує процес буріння являється втрата стійкості та деформація бурильних колон в середині похилих та криволінійних свердловин. Питання випинання бурильних колон в порожнинах похилих циліндричних свердловин привертає увагу багатьох фахівців, однак далеке від свого вирішення. Дану особливість можна пояснити складністю його математичної моделі, що описується за допомогою сингулярно-збурених рівнянь. Їхні рішення мають форму крайових ефектів або гармонічних сплесків локалізованих в попередньо не визначених зонах свердловин. Таким чином дана проблема має бути визначена по всій довжині бурильної колони, або в області будь-якої її частини включаючи очікувану зону випинання.

У даній роботі розроблена математична модель для комп'ютерного аналізу початкового вигину бурильної колони в циліндричному каналі похилої свердловини. Визначальне рівняння виводиться з урахуванням впливу сили тяжіння, контактних сил та сил тертя. Комп'ютерне моделювання поведінки бурильної колони проводиться для різних значень кутів нахилу свердловини, її довжини та коефіцієнту тертя. Знайдені значення критичної сили та побудовані форми втрати стійкості. Чисельні результати для випадку, коли кут нахилу дорівнює куту тертя збігаються з результатами отриманими аналітично.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Перший системний аналіз явищ критичного та закритичного випинання бурильних колон в вертикальних свердловинах був викладений Lubinski та ін. в 1962 р [1], та похилих свердловинах в статті Dawson та Pasley 1984 р [2]. Вони виявили механізм втрати стійкості бурильної колони в вертикальній свердловині та встановили критичні умови її випинання. З тих пір були розглянуті різні моделі втрати стійкості бурильної колони в каналах свердловин під дією сили тяжіння, контактної сили, сил тертя, а також крутного моменту та зовнішньої осьової сили. З розвитком нафтогазової промисловості аналізом даної проблеми займалися такі вчені як (Gao та Liu [3], Гуляев та ін. [4 – 6], Huang і Gao [7], Kyllingstad [8], Mitchell і Samuel [9]), вони внесли багато уточнень в теоретичні моделі впливу втрати стійкості. Детальний огляд цієї проблеми був викладений в роботах Cunha [10], Mitchell [11]. Можна зробити висновок, що в основному, підходи які використовувались ґрунтувались на наближених режимах втрати стійкості бурильної по синусоїдальним або спіральним кривим, та як показано в роботах Гуляєва та ін. [6, 12] проблема втрати стійкості бурильної колони в каналах довгих свердловин є сингулярно-збуреною і відбувається через формування гармонійних або спіральних вейвлетів зі змінними кроками в різних сегментах довжини бурильної колони.

Рівняння критичних станів БК в середині похилих свердловин.

Розглянемо задачу про пружне випинання БК всередині циліндричного каналу похилої свердловини. БК попередньо напружена силами тяжіння $\mathbf{f}^{gr}(s)$ розподіленими по всій її довжині та осьюовою стискаючою силою $F_z(s)$ на своєму нижньому кінці $s = S$. Дія цих сил пов'язана з зародженням внутрішньої сили $\mathbf{F}(s)$, моменту $\mathbf{M}(s)$ та як і зовнішніх контактних сил ($\mathbf{f}^{cont}(x)$) та сил тертя ($\mathbf{f}^{fr}(x)$).

Особлива увага має бути приділена ефектам сил тертя. У нашому випадку розглядаються дві ситуації, коли БК нерухома в перед критичному стані, і коли вона вигинається під час проходки і буріння. Можна припустити, що в першому випадку БК піддається дії різних динамічних навантажень (наприклад, селевих потоків), які зменшують вплив сили тертя і тоді $\mathbf{f}^{fr}(s) = 0$. У той час як під час осьового руху БК ця сила визначається за формулою:

$$f^{fr}(s) = \pm \mu f^{cont}(s) \quad (1)$$

де μ коефіцієнт тертя і вибір знаку "+" чи "-" залежить від напрямку руху БК.

Таким чином, завдання полягає в тому, щоб встановити типові закономірності впливу сил тертя на процес втрати стійкості. В результаті дій цих сил, БК може бути розтягнутою в верхній зоні і стисненою в нижньому сегменті. Отже, її критична втрата стійкості переважає внизу, де вісь свердловини є, як правило, майже прямолінійною.

Під час критичного деформування, БК може набувати складної форми, тому для її аналізу використовується теорія криволінійних гнучких стрижнів. Моделювання біфуркаційного випинання базується на аналізі нелінійних рівнянь рівноваги криволінійних стрижнів, які представлені в скалярній формі в рухомій системі координат $oxuz$ [6, 12] в якості рівнянь рівноваги сил

$$\begin{aligned} dF_x / ds &= -k_y F_z + k_z F_y - f_x^{gr} - f_x^{cont}, \\ dF_y / ds &= -k_z F_x + k_x F_z - f_y^{gr}, \\ dF_z / ds &= -k_x F_y + k_y F_x - f_z^{gr} - f_z^{fr}, \end{aligned} \quad (2)$$

і моментів

$$\begin{aligned} dM_x / ds &= -k_y M_z + k_z M_y + F_y, \\ dM_y / ds &= -k_z M_x + k_x M_z - F_x, \\ dM_z / ds &= -k_x M_y + k_y M_x. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут стають помітними переваги вибраної системи відліку $oxuz$ і вектора ω [6]. Тільки один невідомий компонент $f_x^{cont}(s)$ контактної сили $\mathbf{f}^{cont}(s)$ присутній у першому рівнянні системи (2) і один невідомий компонент $f_z^{fr}(s)$ сили тертя $\mathbf{f}^{fr}(s)$ входить до її третього рівняння. Ці фактори дозволяють спростити формули (2) і (3). Так, згинальні моменти M_x , M_y , в рівняннях (3) виражаються через кривизни [6] і мають вигляд $M_x = EI k_x$, $M_y = EI k_y$, а поперечні сили F_x і F_y можуть бути знайдені виходячи з двох перших рівнянь системи (3).

$$\begin{aligned} F_x &= -2EIav'v'' - a(M_z - EIU'v')(u''v' - v''u') \\ F_y &= -EIa \frac{d}{ds}(u''v' - v''u') + a(M_z - EIU'v')(v')^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Права частина третього рівняння системи (3) дорівнює нулю, а крутний момент M_z є сталим по всій довжині БК.

Використовуючи рівняння (1) – (4) отримуємо систему з шести рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{dF_y}{ds} &= 2EIau'(v')^2 v'' - (M_z - EIU'v')u'v'k_x + k_x F_z - f_y^{gr} \\ \frac{dF_z}{ds} &= -k_x F_y - 2EIa^2(v')^3 v'' + a(M_z - EIU'v')(v')^2 k_x - f_z^{gr} - f_z^{fr} \\ \frac{dk_x}{ds} &= -\frac{1}{EI} a(v')^2 M_z + au'(v')^3 + \frac{1}{EI} F_y \\ \frac{dv}{ds} &= v' \\ \frac{du}{ds} &= \sqrt{1 - a^2(v')^2} \end{aligned} \quad (5)$$

У цій системі, змінні F_x і M_y виключаються з розгляду, так як вони можуть бути представлені через геометричні параметри поверхні G , в той час як компоненти сили тяжіння визначаються за формулами

$$\begin{aligned} f_x^{gr} &= -f^{gr} \sin \beta \cos v \\ f_y^{gr} &= f^{gr} (\cos \beta \cdot av' + \sin \beta \sin v \cdot u') \\ f_z^{gr} &= f^{gr} (\cos \beta \cdot u' - \sin \beta \sin v \cdot av') \end{aligned} \quad (6)$$

Перше рівняння системи (2) не входить в систему (3), але воно використовується для розрахунку контактної сили

$$f_x^c = -\frac{dF_x}{ds} - k_y F_z + u'v'F_y - f_x^{gr} \quad (7)$$

Рівняння (5) з відповідними граничними умовами описує нелінійний вигин БК під дією гравітаційних сил і сил тертя, а також зовнішніх осьових сил, що діють на кінці БК всередині каналу похилої прямолінійної свердловини. Стани БК, коли лінеаризований оператор системи (5) вироджується є критичними (біфуркаційними). Власні значення і власні режими цієї системи визначають критичні навантаження і форми втрати стійкості (випинання) в даних станах.

Рівняння критичних станів БК всередині похилої свердловини.

Розглянемо прямолінійну БК, що вільно лежить або проковзує вздовж своєї осі на дні $u = 0$ прямолінійної свердловини. Треба обчислити її критичну силу і побудувати форму випинання. З цією метою, пролінеаризуємо формули (5) в безпосередній близькості даного стану $u(s) = s$, $v(s) = 0$, $k_x(s) = k_y(s) = k_z(s) = 0$, $M_x(s) = M_y(s) = 0$. У цьому стані, контактна сила $f_x^{cont}(s)$ є сталою і легко визначається формулою:

$$f_x^{cont}(s) = -f_x^{gr} \quad (8)$$

Сила тертя f_z^{fr} обчислюється наступним чином:

$$f_z^{fr}(s) = \pm \mu f_x^{cont} = \mp \mu f_x^{gr} \quad (9)$$

Після цього, з другого рівняння системи (5) знаходиться функція $F_z(s)$:

$$F_z(s) - F_z(0) = - \int_0^s (f_z^{gr} + f_z^{fr}) ds = -(f_z^{gr} + f_z^{fr})s - R \quad (10)$$

Тут, $F_z(0)$ є значення сили F_z в точці підвісу $s=0$. Якщо режим опускання БК вибирається, то $F_z(0) = (f_z^{gr} + f_z^{fr})S$ і R визначає стискаючу силу, що діє на нижньому кінці БК. В результаті цих зауважень, після лінеаризації системи (5), використовуються тільки чотири рівняння. Перепишемо їх у лінеаризованій формі:

$$\begin{aligned} d\delta F_y / ds &= F_z \delta k_x - a f^{gr} \cos \beta \delta v', \\ d\delta F_z / ds &= -\delta f_z^{gr} = 0, \\ d\delta k_x / ds &= (1/EI) \delta F_y, \\ d\delta v / ds &= \delta v', \\ d\delta v' / ds &= (1/a) \delta k_x, \\ d\delta u / ds &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Прийmemo до уваги, що $\delta k_x = a \delta v''$, $\delta F_y = EI a \delta v'''$, $\delta f_x^{gr} = 0$, $f^{cont}(s) = f^{gr} \sin \beta$, $f_z^{fr}(s) = \pm \mu f^{gr} \sin \beta$, $f^{gr} = g(\rho_t - \rho_m)F$, де $g = 9.81 \text{ м/с}^2$; ρ_t , ρ_m – щільність матеріалу труби та промивної рідини; F – це площа перерізу труби БК; знак "+" вибирається для підйому, знак "-" для опускання БК.

Далі буде розглядатися режим опускання БК, тому:

$$F_z(s) = f^{gr} (\cos \beta - \mu \sin \beta)(S - s) - R \quad (12)$$

Друге та шосте рівняння системи (11) тривіальні, і тому їх можна опустити, інші чотири рівняння можна переписати в більш зручній формі:

$$\delta y^{IV} + \left[-\frac{f^{gr} (\cos \beta - \mu \sin \beta)}{EI} (S - s) + \frac{R}{EI} \right] \delta y'' + \frac{f^{gr} (\cos \beta - \mu \sin \beta)}{EI} \delta y' + \frac{f^{gr} \sin \beta}{aEI} \delta y = 0, \quad (13)$$

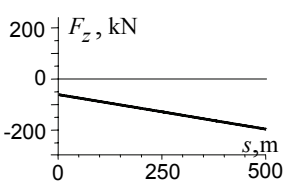
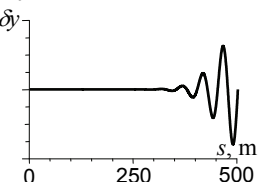
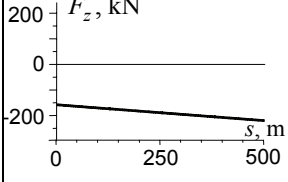
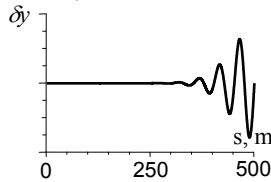
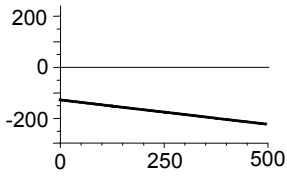
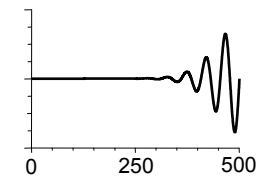
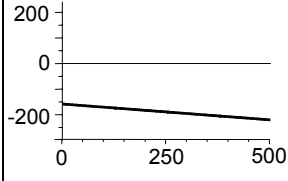
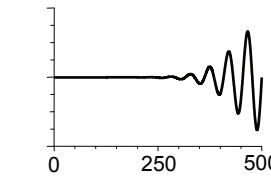
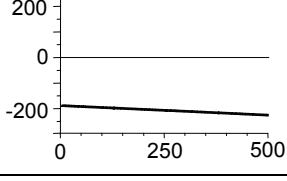
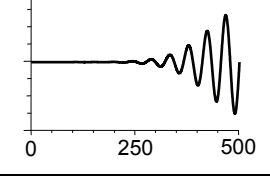
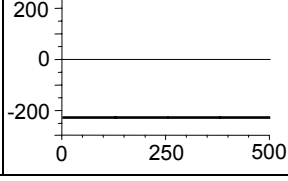
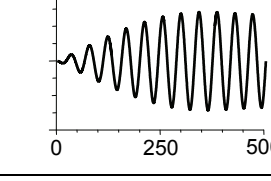
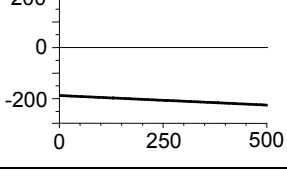
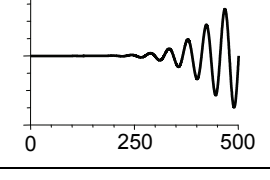
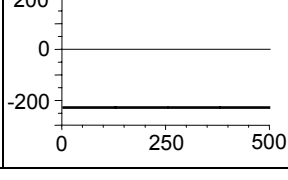
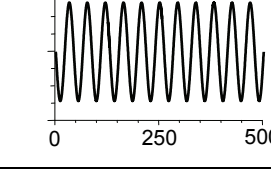
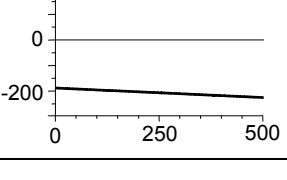
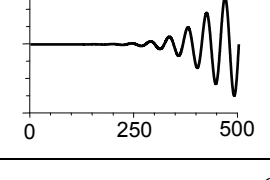
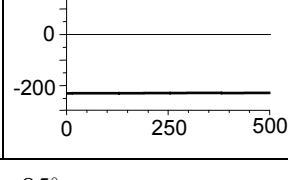
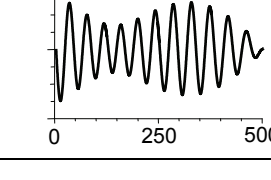
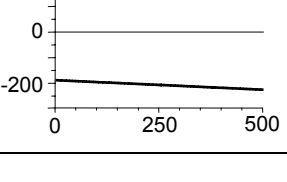
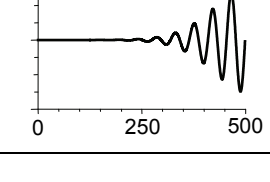
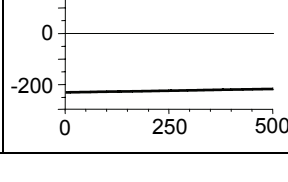
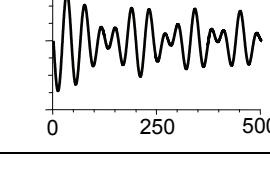
де $\delta y(s) = a \delta v(s)$.

Це однорідне диференціальне рівняння четвертого порядку аналогічне рівнянню стійкості пучка на пружній основі, і тому їх розв'язки мають схожі властивості. У першу чергу, вони обидва сингулярно збудені і з цієї причини, режими їх втрати стійкості мають форми крайових ефектів, як правило, локалізованих в граничних зонах. По-друге, зазвичай, ці режими є гармонічно затухаючими коливаннями. Дуже важливою властивістю цього рівняння є те, що крутний момент M_z , представлений в системі (5), зникає в результаті її лінеаризації в безпосередній близькості даного стану. Цей факт свідчить про нечутливість системи до кручення БК в цьому положенні.

Біфуркація випинання БК в каналі похилої свердловини.

Слід підкреслити, що рівняння (13) має змінні коефіцієнти, тому його власні значення і власні режими можуть бути проаналізовані тільки за допомогою чисельних методів. У розглянутому

Таблиця 1 – Критична сила R_{cr} і форма випинання $\delta y(s)$ для випадку $S=500$ м., і $a=0.166$ м.

	Модель без тертя		Модель з тертям	
1	Кут нахилу $\beta = 45^\circ$			
		$R_{cr} = 203.772$ kN 		$R_{cr} = 202.129$ kN 
2	$\beta = 60^\circ$			
		$R_{cr} = 221.771$ kN 		$R_{cr} = 219.441$ kN 
3	$\beta = 78.495^\circ$			
		$R_{cr} = 230.962$ kN 		$R_{cr} = 224.922$ kN 
4	$\beta = 78.69^\circ$			
		$R_{cr} = 230.942$ kN 		$R_{cr} = 225.856$ kN 
5	$\beta = 79.06824^\circ$			
		$R_{cr} = 230.997$ kN 		$R_{cr} = 227.518$ kN 
6	$\beta = 85^\circ$			
		$R_{cr} = 230.962$ kN 		$R_{cr} = 229.450$ kN 

випадку, для цієї мети був використаний метод скінченних різниць. Далі, представлені результати комп'ютерного моделювання. У першу чергу, зауважимо, що поставлене завдання є багатопараметричним. Дійсно, втрата стійкості залежить від довжини БК, поперечного перерізу, кута

нахилу, значення зазору, наявності або відсутності ефектів тертя і величини коефіцієнта тертя, значення стискаючої сили R , граничних умов, і так далі.

Розглянемо випадок з наступними величинами і значеннями характерних параметрів: $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Па, $I = 2.7 \cdot 10^{-4}$ м⁴, $\rho_l = 7.8 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_m = 1.3 \cdot 10^3$ кг/м³, $d_1 = 0.2$ м, $d_2 = 0.18$ м, $F = \pi(d_1^2 - d_2^2)/4 = 0.00597$ м², $\mu = 0.2$. Граничні умови на верхньому і нижньому краях відповідають закріпленним кінцям.

$$\delta y'(0) = \delta y'(S) = 0, \quad \delta y''(0) = \delta y''(S) = 0 \quad (14)$$

Дослідимо поведінку БК довжиною $S = 500$ м та величиною зазору $a = 0.166$ м. Результати розрахунку демонструються в таблиці 1. Два лівих стовпчика цієї таблиці відносяться до моделі без тертя, два правих містять дані пов'язані з її впливом. Діаграми осьової сили $F_z(s)$, випинання $\delta y(s)$ і критичного значення R_{cr} наведені для кожного випадку, що розглядається, при різних значеннях кута нахилу β . Видно, що якщо кут β не дуже великий ($\beta = 45^\circ$ і 60°), при розтягуванні, гравітаційні сили ведуть до зменшення осьової сили $F_z(s)$ у верхній зоні БК і вигляд біфуркаційного випинання $\delta y(s)$ набуває форми крайового ефекту. При цьому, сили тертя лише незначно впливають на критичне значення R_{cr} і функцію $\delta y(s)$. Але коли кут β наближається до $\beta = \arcsctg \mu$, значення, сили тяжіння і сили тертя врівноважують одна одну, і має місце рівність $\cos \beta - \mu \sin \beta = 0$, функція $F_z(s)$ стає сталою, і рівняння (13) набуває спрощеної форми:

$$\delta y^{IV} + \frac{R}{EI} \delta y'' + \frac{f^{gr} \sin \beta}{aEI} \delta y = 0 \quad (15)$$

Це рівняння з умовами (14) може бути вирішене аналітично.

Як можна бачити, критична сила і форма втрати стійкості не демонструють будь-яких істотних змін в моделі тертя, але в умовах наявності цієї сили, зона гармонічного вейвлету розширюється зі збільшенням кута β . Це поширюється по всій довжині БК (позиція 3) і стає простою синусоїдою, коли кут її нахилу дорівнює куту тертя (положення 4). Після переходу через цю зону, форми втрати стійкості менш впорядковані (позиції 5 і 6). У той же час, якщо сили тертя дорівнюють нулю, то режим випинання набуває форми крайового вейвлету і значення R_{cr} збільшуються зі збільшенням кута β .

Показані особливості втрати стійкості БК пов'язані з декількома факторами. Коли кут β невеликий, БК напружена осьовими силами у верхній частині та стискаючою силою у своїй нижній частині. У цьому випадку напружено-деформований стан БК, по суті неоднорідний. У той же час, нормальна компонента сили тяжіння, що притискає БК до стінки свердловини та перешкоджає її випинанню, невелика і БК вільно випинається нижче. З розширенням кута розтягуючі сили зменшуються, і напружено-деформований стан БК стає більш однорідним, а стабілізуючий ефект сил розтягнення зменшується. Але контактні сили і сили тертя, а також нормальна складова сили тяжіння, збільшуються. Ця функція відповідає за те, що ефект випинання піднімається вгору. Взаємодія цих суперечливих властивостей зі збільшенням кута β приводить до незначного зміни критичної сили F_{cr} .

Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0115U002270 «Комп'ютерне прогнозування і запобігання аварійним режимам буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин на етапах їх проектування і проходки»

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lubinski A., Althouse W.S., and Logan J.L. Helical buckling of tubing sealed in packers. Journal of Petroleum Technology. 1962. 14(6), Trans., AIME., 225 (June). 655–670.

2. Dawson R., Paslay R.R. Drill pipe buckling in inclined holes. *Journal of Petroleum Technology*. 1984. V. 36. P. 1734–1738
3. Gao D.L. Liu F.W. The post-buckling behavior of a tubular string in an inclined wellbore. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2013. V. 90(1). P. 17–36.
4. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2011. V. 78. P. 759 – 764.
5. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. V.67. P. 140 – 148.
6. Gulyayev V.I., Andrusenko E.N., Shlyun N.V. Theoretical modelling of post - buckling contact interaction of a drill string with inclined bore-hole surface. *Structural Engineering and Mechanics*. 2014. V.49(4). P. 427-448.
7. Huang W.J., Gao D.L. Helical buckling of a thin rod with connectors constrained in a cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. V.84. P. 189–198.
8. Kyllingstad A. Buckling of tubular strings in curved wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1995. V.12(3). P. 209–218.
9. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque/drag model? *SPE Drilling and Completion*. 2009. V. 24(1). P.62–71.
10. Cunha J. C. Buckling of tubulars inside wellbores: A review on recent theoretical and experimental works. *SPE Drilling and Completion*. 2004 (March). 13–18.
11. Mitchell, R.F. Tubing buckling – the state of the art. *SPE Drilling and Completion*. 2008 (December). 361–370.
12. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Andrusenko E.N., Shlyun N.V. Critical buckling of drill strings in curvilinear channels of directed bore-holes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. V. 129, No 1. P. 168–177.

REFERENCES

1. Lubinski A., Althouse W.S., and Logan J.L. Helical buckling of tubing sealed in packers. *Journal of Petroleum Technology*. 1962. 14(6), Trans., AIME., 225 (June). 655–670.
2. Dawson R., Paslay R.R. Drill pipe buckling in inclined holes. *Journal of Petroleum Technology*. 1984. V. 36. P. 1734–1738
3. Gao D.L. Liu F.W. The post-buckling behavior of a tubular string in an inclined wellbore. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2013. V. 90(1). P. 17–36.
4. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2011. V. 78. P. 759 – 764.
5. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. V.67. P. 140 – 148.
6. Gulyayev V.I., Andrusenko E.N., Shlyun N.V. Theoretical modelling of post - buckling contact interaction of a drill string with inclined bore-hole surface. *Structural Engineering and Mechanics*. 2014. V.49(4). P. 427-448.
7. Huang W.J., Gao D.L. Helical buckling of a thin rod with connectors constrained in a cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. V.84. P. 189–198.
8. Kyllingstad A. Buckling of tubular strings in curved wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1995. V.12(3). P. 209–218.
9. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque/drag model? *SPE Drilling and Completion*. 2009. V. 24(1). P.62–71.
10. Cunha J. C. Buckling of tubulars inside wellbores: A review on recent theoretical and experimental works. *SPE Drilling and Completion*. 2004 (March). 13–18.
11. Mitchell, R.F. Tubing buckling – the state of the art. *SPE Drilling and Completion*. 2008 (December). 361–370.
12. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Andrusenko E.N., Shlyun N.V. Critical buckling of drill strings in curvilinear channels of directed bore-holes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. V. 129, No 1. P. 168–177.

РЕФЕРАТ

Шлюнь Н.В. Вплив сили тертя на біфуркаційне випинання бурильних колон в прямолінійних похилих свердловинах / Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2016. – Вип. 1 (34).

У статті досліджується задача про вплив сили тертя на характер біфуркаційного випинання БК. Розглянута похила циліндрична форма свердловини, побудовано рівняння критичного випинання БК в цій свердловині. Знайдено критичні значення осьової стискаючої сили, прикладеної до нижнього кінця БК під дією сили тертя та без неї. Встановлено, що критичні значення осьової сили підкорюються деяким закономірностям, пов'язаним з модами випинання. Показано, що відповідно до висновків теорії сингулярно збурених рівнянь форми втрати стійкості БК мають вигляд крайових ефектів, але під дією сили тертя зона випинання збільшується і зміщується вгору вздовж БК.

Об'єкт дослідження – бурильні колони в каналах похилих свердловин.

Мета роботи – дослідити вплив сили тертя на характер біфуркаційного випинання БК.

Методи дослідження – бурильна колона ототожнювалася з наддовгим трубчастим стержнем. Математична модель квазістатичної поведінки бурильної колони до її фрикційної взаємодії зі стінкою свердловини будувалась у вигляді сингулярно збурених диференціальних рівнянь руху обертового наддовгого стержня в пружній постановці. Для аналізу геометрії деформованої бурильної колони використовуються методи теорії геодезичних кривих на поверхнях.

Результати статті можуть бути впроваджені в технології буріння глибоких свердловин.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – пошук оптимальних режимів буріння.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БУРИЛЬНА КОЛОНА, ПОХИЛА СВЕРДЛОВИНА, ГЕОДЕЗИЧНА КРИВА, БІФУРКАЦІЙНЕ ВИПИНАННЯ.

ABSTRACT

Shlyun N.V. Influence Of friction forces on bifurcation buckling of drill strings in inclined wells / Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2016. – Issue 1 (34).

In the paper, the problem of influence of friction forces on the character of the DS buckling is analyzed. The inclined cylindrical shape of the bore-hole is considered, equations of critical buckling of the DS in this well considered. The critical values of the axial compressing force applied to its lower end are found for cases of frictional and frictionless interactions. It is established that according to regularities typical for singularly perturbed systems the mode of stability loss have the shapes of boundary effects, though under action of friction forces they displace upward along the DS.

The research aim is to investigate the friction force influence on the character of the DS buckling.

The method of analysis. The drill string is considered as long elastic tube rod. Mathematical model of the rod quasistatic mechanical behavior in the case of its friction interaction with the bore-hole wall is constructed in the form of singularly perturbed differential equations of a long string with the use of elastic statement. To analyse geometry of the drill string, the method of the theory of geodesical curves in surfaces are used.

The results of the article can be inculcated in technologies of deep bore-hole drilling.

Forecast assumptions about the object of study – the search of optimal regimes of drilling.

KEYWORDS: DRILL STRING, INCLINED BORE-HOLE, GEODESICAL CURVE, BIFURCATION BUCKLING.

РЕФЕРАТ

Шлюнь Н.В. Влияние сил трения на бифуркационное выпучивание бурильных колон в прямолинейных наклонных скважинах / Н.В. Шлюнь // Вестник Национального транспортного университета. Серія «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2016. – Вып. 1 (34).

В статье исследуется задача о влиянии сил трения на характер бифуркационного выпучивания БК. Рассмотрена цилиндрическая форма скважины, построено уравнение критического выпучивания БК в этой скважине. Найдены критические значения осевой сжимающей силы, приложенной к

нижнему концу БК под действием силы трения и без нее. Установлено, что критические значения осевой силы подчиняются некоторым закономерностям, связанным с модами выпучивания. Показано, что в соответствии с выводами теории сингулярно возмущенных уравнений формы потери устойчивости БК имеют вид краевых эффектов, но под действием силы трения зона выпучивания увеличивается и смещается вверх по длине БК.

Объект исследования – бурильные колонны в каналах наклонных скважин.

Цель работы – исследовать влияние сил трения на характер бифуркационного выпучивания БК.

Методы исследования – бурильная колонна отождествлялась со сверхдлинным трубчатым стержнем. Математическая модель квазистатического поведения бурильной колонны при ее фрикционном взаимодействии со стенкой скважины строилась в виде сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений движения вращающегося сверхдлинного стержня в упругой постановке. Для анализа геометрии деформированной бурильной колонны используются методы теории геодезических кривых на поверхностях.

Результаты статьи могут быть внедрены в технологии бурения глубоких скважин.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – поиск оптимальных режимов бурения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, КРИВОЛИНЕЙНАЯ СКВАЖИНА, ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ КРИВАЯ, БИФУРКАЦИОННОЕ ВПУЧИВАНИЕ, ЗАКРИТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ.

АВТОР:

Шлюнь Н.В., ассистент, Национальный транспортный университет, e-mail: nataliyashlyun@gmail.com, тел. +380675936346, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42, к. 511.

AUTHOR:

Shlyun N. V., post-graduate students, National Transport University, e-mail: nataliyashlyun@gmail.com, tel. +380675936346, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str., 42, of. 511

АВТОР:

Шлюнь Н.В., аспирант, Национальный транспортный университет, e-mail: nataliyashlyun@gmail.com, тел. +380675936346, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе, 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gaidaichuk V.V., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Loza I.A., Ph.D., Physics and Mathematics (Dr), professor, National Transport University, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.