

УДК 539.3
UDC 539.3

МІНІМІЗАЦІЯ СИЛ ОПОРУ ПРИ ОСЬОВОМУ РУСІ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ У КРИВОЛІНІЙНІЙ СВЕРДЛОВИНІ

Гуляев В.І., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Андрусенко О.М., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Левківська Л.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

MINIMIZATION OF RESISTANCE FORCES IN AXIAL MOTION OF A DRILL STRING IN A CURVE BORE-HOLE

Gulyayev V.I., Doctor of Science (Technology), National Transport University, Kiev, Ukraine
Andrusenko E.N., Ph.D., National Transport University, Kiev, Ukraine
Levkivska L.V., Ph.D., National Transport University, Kiev, Ukraine

МИНИМИЗАЦИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ОСЕВОМ ДВИЖЕНИИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В КРИВОЛИНЕЙНОЙ СКВАЖИНЕ

Гуляев В.И., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Андрусенко Е.Н., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Левковская Л.В., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми.

При бурінні похило-скерованих та горизонтальних свердловин найбільш важливою причиною виникнення аварійних ситуацій та ускладнення умов буріння є геометричні недосконалості траєкторії свердловини та обумовлені ними додаткові сили контактної та фрикційної взаємодії між бурильною колоною і стінкою свердловини. У роботі поставлена задача про мінімізацію енергозатрат при виконанні технологічних операцій буріння за рахунок підбору відповідного значення відношення між швидкостями осьового і обертального рухів бурильної колони.

Аналіз сучасної науково-технічної літератури (в основному, англійської) [1, 2] показав, що теоретичне дослідження колон в криволінійних свердловинах зводиться до розгляду спрощених моделей будівельної механіки руху абсолютно гнучкої нитки і найпростіших траєкторій свердловин, що складаються з прямолінійних ділянок, з'єднаних дугами кіл або ланцюгових ліній. Такий підхід може бути використаний лише для свердловин з ідеальною геометрією і не придатний для реальних свердловин [3].

Враховуючи, що в даний час в Україні активно проводиться пошук природного газу в сланцевих породах і на великих глибинах у шельфових зонах морських акваторій, видобуток яких може здійснюватися тільки за допомогою технологій, що використовують криволінійні свердловини, можна зробити висновок, що проблема комп'ютерного моделювання процесів пружного згинання бурильних колон у криволінійних свердловинах з геометричними недосконалостями є актуальною [4, 5].

Мета роботи полягає в постановці і розв'язанні задач будівельної механіки про нелінійне деформування бурильних колон в глибоких похило-скерованих і горизонтальних свердловинах з урахуванням наявності в траєкторіях їх осьових ліній локалізованих геометричних недосконалостей, у виконанні комп'ютерного аналізу їх впливу на значення сил опору осьовому переміщенню бурильної колони при виконанні технологічних операцій буріння; проведенні дослідження з підбору найменш енергоємних режимів операцій буріння.

Виклад основного матеріалу.

У даній роботі описана методика комп'ютерного моделювання технологічних прийомів, що мінімізують енерговитрати при переміщенні БК в каналі свердловини з геометричними

недосконалостями. Вона може бути використана на етапах проектування геометрії свердловини і визначення вимог до її точності, на етапах проектування режимів проходки свердловини і їх здійснення, а також при виконанні операції звільнення БК від прихопленя.

З метою моделювання механічних явищ, супутніх процесу буріння, і вибору їх найбільш сприятливих характеристик використовуємо математичну модель, засновану на теорії гнучких криволінійних стержнів [6, 7]. Прийmemo, що БК переміщується з осьовою швидкістю \dot{w} і обертається з кутовою швидкістю ω в каналі свердловини, осьова лінія T якої відома. У нерухомій декартовій системі координат $Oxyz$ вона задається

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad z = z(s) \quad (1)$$

Диференційовна вектор-функція $\rho = xi + yj + zk$ описує осьову лінію свердловини; i, j, k – орти системи координат $Oxyz$; s – параметр, що вимірюється довжиною осьової лінії від початкової точки до даної.

Вважаємо, що осьові лінії БК і свердловини збігаються. Тоді за допомогою рівності (1) можна визначити всі геометричні характеристики вигнутої БК і підрахувати її згинний напружений стан.

Пов'яжемо з лінією T рухливий тригранник Френе. Його одиничні вектори τ, n, b підраховуються так [4]

$$\tau = \rho', \quad n = R\rho'', \quad b = \tau \times n$$

Тут штрихом позначено диференціювання за s ; R – радіус кривини, що визначає кривину k_R осьової лінії і скрут k_T

$$k_R = 1/R = |\rho''|, \quad k_T = \frac{\rho'(\rho'' \times \rho''')}{(\rho'')^2}. \quad (2)$$

З використанням співвідношень (1) – (2) виводяться рівняння, що визначають компоненти вектора сил тяжіння

$$f_n^{gr} = -ag(\gamma_t - \gamma_l)n_z, \quad f_b^{gr} = -ag(\gamma_t - \gamma_l)b_z, \quad f_\tau^{gr} = ag(\gamma_T - \gamma_l)\tau_z. \quad (3)$$

а також компоненти сили контактної взаємодії між БК і свердловиною

$$\begin{aligned} f_n^c &= -k_R F_\tau + k_R k_T M_\tau - Ak_R k_T^2 + A \frac{d^2 k_R}{ds^2} - f_n^{gr}, \\ f_b^c &= k_R m_\tau^{fr} + 2Ak_T \frac{dk_R}{ds} - M_\tau \frac{dk_R}{ds} + Ak_R \frac{dk_T}{ds} - f_b^{gr}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут F_τ і M_τ – внутрішня осьова сила і крутний момент; A – згинна жорсткість БК.

Прийmemo, що БК переміщується в свердловині зі швидкістю \dot{w} і одночасно обертається з кутовою швидкістю ω . Тоді між поверхнями БК і свердловини реалізуються умови тертя Кулона.

Внаслідок цього напружено-деформований стан БК може бути описано двома рівняннями першого порядку [8]

$$\frac{dF_\tau}{ds} = k_R F_n - f_\tau^{gr} - f_\tau^{fr}, \quad \frac{dM_\tau}{ds} = -m_\tau^{fr}. \quad (5)$$

де функції k_R і f_τ^{gr} – відомі, а шукані функції тертя f_τ^{fr} , m_τ^{fr} , а також F_n можуть бути визначені за допомогою рівнянь (3) – (5).

Роботу dW_i з виконання технологічної операції на елементарному відрізку ds можна представити у вигляді

$$dW_i = F_w(S_i)ds + M_w(S_i)d \quad (6)$$

Оскільки

$$\eta = \frac{\omega d/2}{\dot{w}} = \frac{(d/2)d}{ds}$$

можна зробити заміну $d = \frac{\eta ds}{d/2}$ і елементарну роботу dW_i представити у вигляді

$$dW_i = [F_w(S_i) + \eta M_w(S_i)]ds = Q_i ds, \quad (7)$$

де $Q_i = F_w(S_i) + \eta M_w(S_i)$ – узагальнена сила, відповідна переміщенню ds .

Розв'язуючи систему (5) з урахуванням реальної довжини S_i і наявних на цьому етапі геометричних недосконалостей при різних η , підберемо таке значення η_i , при якому dW_i для даного режиму при даній довжині S_i має мінімум. У цьому випадку величина ω_i вибирається, виходячи з технічних даних і можливостей приводного пристрою бурильної установки.

Результати досліджень.

Знайдені значення ω_i , η_i , $F_w(S_i)$, $M_w(S_i)$ використовуються для проходки свердловини на її відрізку $\Delta S_i = S_{i+1} - S_i$, після чого за описаною методикою обчислюються значення ω_{i+1} , η_{i+1} , $F_w(S_{i+1})$, $M_w(S_{i+1})$ і описана процедура повторюється на відрізку ΔS_{i+1} . Відзначимо, що якщо виконується операція підйому бурильної колони, то $\Delta S_i < 0$ і S_i дискретно змінюється від $S_1 = S$ до $S_N = S/N$, де N – число відрізків, на які умовно розбивається осьова лінія свердловини. При спуску бурильної колони $\Delta S_i > 0$ і S_i змінюється від $S_1 = S/N$ до $S_N = S$.

Зазначимо, що запропонований підхід може бути використаний як на етапі проектування свердловини, так і при її проходці. У першому випадку гіпотетичні параметри траєкторії свердловини і її недосконалостей можуть змінюватись в широких межах, виходячи з технологічних можливостей їх реалізації. У другому випадку задаються реальні значення параметрів, знайдені в результаті проведення робіт каротажного зондування.

За допомогою запропонованого підходу розв'язана задача про проектування енергозберігаючого режиму підйому бурильної колони в свердловині з локалізованими спіральними недосконалостями. Розглянуто випадок, коли її траєкторія представляє собою гіперболу в області $3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi$ зміни безрозмірного параметра ϑ зі значенням максимальної глибини $H = 4000$ м, віддаленням по горизонталі від бурильної установки на величину $L = 10000$ м і ексцентриситетом $\varepsilon = 3$. На цю траєкторію накладені спіральні недосконалості при значенні амплітуди $h_c = 2$ м і кроці $\lambda = 91$ м. Центр недосконалості розташований в точці $s_c = 3S/8$. При цьому повна довжина свердловини склала $S = 10943$ м, повна сила тягіння, знайдена з урахуванням дії виштовхуючої сили промивної рідини, склала $P_t = gF(\gamma_{st} - \gamma_l)S = 3389972$ Н.

Для мінімізації енергії, що споживається при виконанні операції підйому бурильної колони, використовуємо метод перебору (метод половинного поділу) на кожному етапі виконання оптимізаційного аналізу. Для цього на етапі моделювання довжина S бурильної колони була поділена на 10 рівних відрізків $\Delta S_i = S/10$ ($i = 1, 2, \dots, 10$), які по черзі видалялися знизу, імітуючи операцію підйому. Послідовність конфігурацій бурильної колони на цих етапах показана на рис. 1.

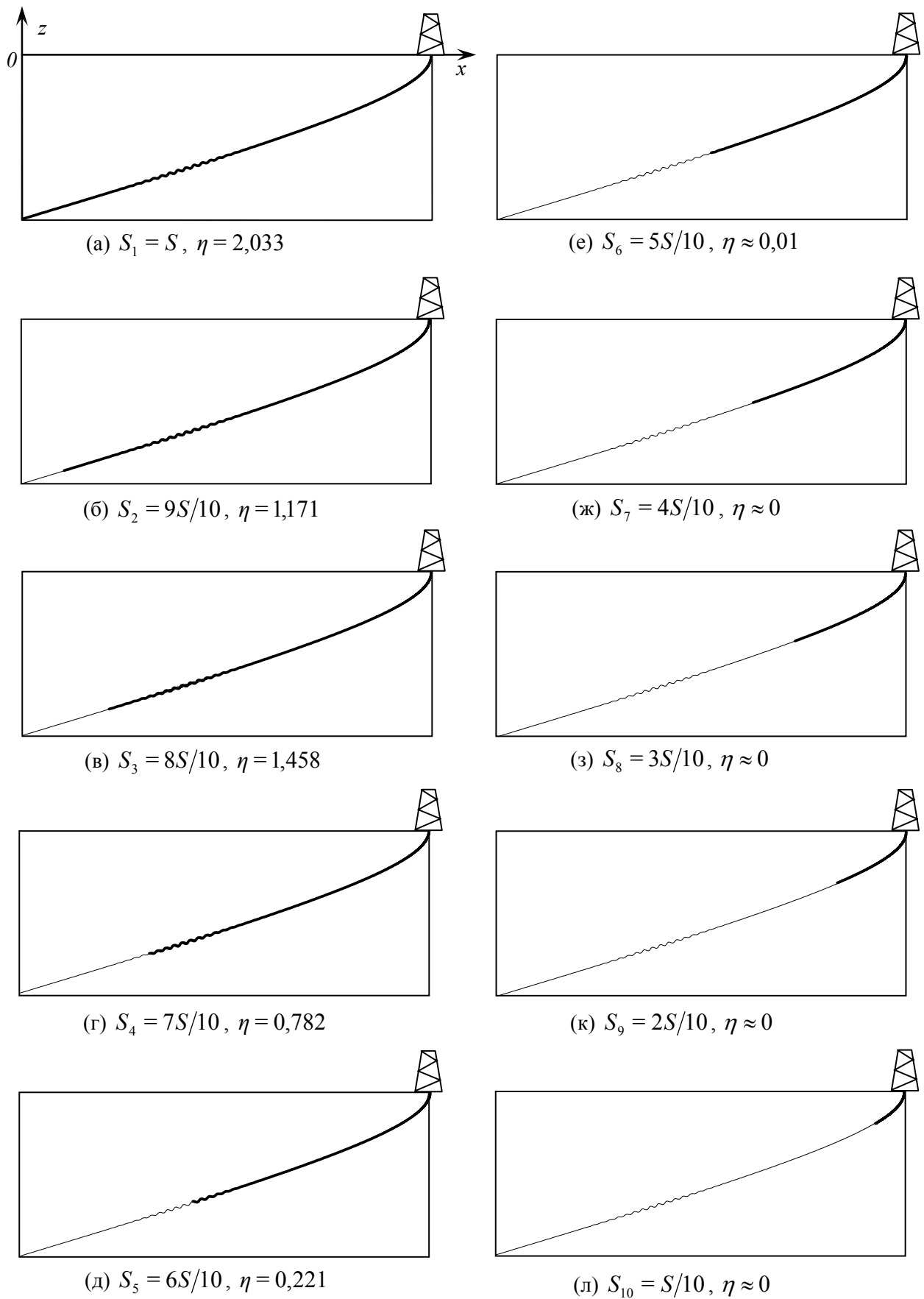


Рисунок 1 – Послідовність конфігурацій бурильної колони в станах її підйому

Підкреслимо, що в масштабі цього малюнка зазначені недосконалості непомітні, тому з метою їх візуалізації масштаб їх амплітуди на діаграмах збільшений в 15 разів. Всього було розв'язано 10 задач, по одній для кожної конфігурації на рис. 1. Спочатку була розглянута бурильна колона повної довжини S (задача 1).

З підйомом бурильної колони її довжина S_i і значення параметрів $F_w(S_i)$, $M_w(S_i)$ зменшуються, і необхідність суміщення операції підйому і обертання стає менше (див. рис. 2, 3).

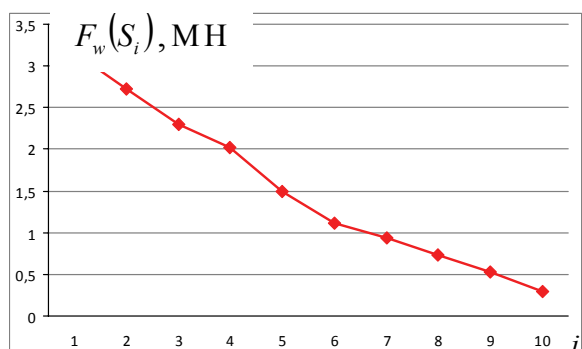


Рисунок 2 – Графік зміни поздовжньої сили $F_w(S_i)$ в точці підвісу бурильної колони при її підйомі

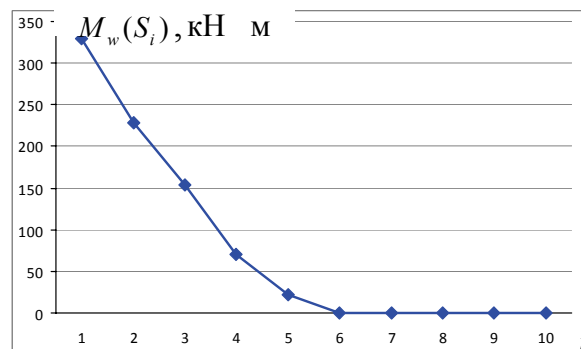


Рисунок 3 – Графік зміни крутного моменту $M_w(S_i)$ в точці підвісу бурильної колони при її підйомі

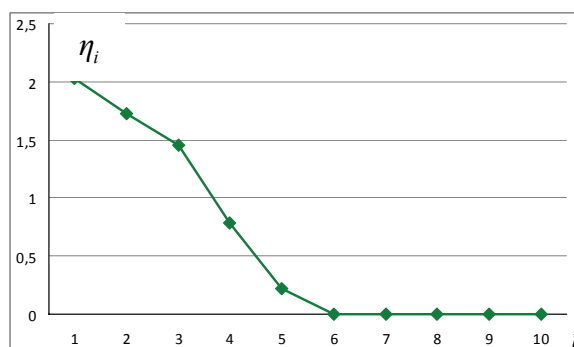


Рисунок 4 – Графік зміни параметра η_i при виконанні операції підйому бурильної колони

Цей висновок підтверджується зменшенням параметра η (рис. 4). При виході бурильної колони із зони недосконалостей значення η швидко зменшуються і операція підйому може бути виконана без її суміщення з операцією обертання.

Аналогічний підхід може бути використаний при проведенні операції спуску. Він може бути корисний також у випадках прихоплень БК, викликаних наявністю недосконалостей. Розроблена методика може бути також використана для моніторингу процесу буріння.

Висновки.

1. Для оцінки сил пружності, а також контактної і фрикційної взаємодії між БК і поверхнею криволінійної свердловини в процесі буріння поставлена задача про пружне згинання БК в каналі її криволінійної порожнини.

2. За допомогою використання розробленого математичного забезпечення показано, що сили опору, що перешкоджають руху БК всередині свердловини можуть бути керованими шляхом поєднання її осового і обертального рухів. Запропоновано метод мінімізації споживаної енергії, заснований на виборі спеціальних значень відносин між швидкостями цих рухів.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0112U000137 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і в шельфових зонах морських акваторій».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Brett J.F., Beckett A.D., Holt C.A., Smith D.L. Uses and limitations of drillstring tension and torque models for monitoring hole conditions. SPE Drill. Eng. 1989. No. 4. P. 223 – 229.
2. Sawaryn S. J., Thorogood J. L. A compendium of directional calculations based on the minimum curvature method. SPE Drill. Complet. 2005. P. 24 – 36. March.
3. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque / drag model? SPE Drilling & Completion. 2009. P. 62 – 7. March.
4. Gulyayev V.I., Andrusenko E.N. Theoretical simulation of geometrical imperfections influence on drilling operations at drivage of curvilinear bore-holes. J. Petr. Sci. Eng. 2013. No. 112. P. 170 – 177.
5. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. J. Petr. Sci. Eng. 2009. No. 67. P. 140 – 148.
6. Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections. Intern. J. of Solids and Structures. 2011. No. 48. P. 110 – 118.
7. Gulyayev V.I., Khudoliy S.N., Andrusenko E.N. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes. Interact. Multiscale Mech. 2011. No. 4 (1). P. 1 – 16.
8. Гуляев В.И., Андрусенко Е.Н. Нелинейное изгибание бурильных колонн в вертикальных скважинах. Проблемы прочности. 2013. №3. С. 120 – 134.

REFERENCES

1. Brett J.F., Beckett A.D., Holt C.A., Smith D.L. Uses and limitations of drillstring tension and torque models for monitoring hole conditions. SPE Drill. Eng. 1989. No. 4. P. 223 – 229.
2. Sawaryn S. J., Thorogood J. L. A compendium of directional calculations based on the minimum curvature method. SPE Drill. Complet. 2005. P. 24 – 36. March.
3. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque / drag model? SPE Drilling & Completion. 2009. P. 62 – 7. March.
4. Gulyayev V.I., Andrusenko E.N. Theoretical simulation of geometrical imperfections influence on drilling operations at drivage of curvilinear bore-holes. J. Petr. Sci. Eng. 2013. No. 112. P. 170 – 177.
5. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. J. Petr. Sci. Eng. 2009. No. 67. P. 140 – 148.
6. Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections. Intern. J. of Solids and Structures. 2011. No. 48. P. 110 – 118.
7. Gulyayev V.I., Khudoliy S.N., Andrusenko E.N. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes. Interact. Multiscale Mech. 2011. No. 4 (1). P. 1 – 16.
8. Gulyayev V.I., Andrusenko E.N. Non-linear bending of drill strings in vertical bore-holes. Strength of Materials. 2013. No. 3. P. 120 – 134.(Rus).

РЕФЕРАТ

Гуляев В.И. Мінімізація сил опору при осьовому русі бурильної колони у криволінійній свердловині / В.И. Гуляев, О.М. Андрусенко, Л.В. Левківська // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

У статті розглянуто задачу комп'ютерного моделювання механічної поведінки бурильних колон у надглибоких похило-скерованих і горизонтальних свердловинах і прогнозування можливого виникнення нештатних ситуацій у режимах буріння і виконання спуско-підйомних операцій.

Об'єкт дослідження – явище пружного деформування бурильної колони в каналі криволінійної свердловини з геометричними недосконаlostями при виконанні технологічних операцій буріння.

Мета роботи полягає в постановці і розв'язанні нових задач будівельної механіки про нелінійне деформування бурильних колон в глибоких похило-скерованих і горизонтальних

свердловинах з урахуванням наявності в траєкторіях їх осевих ліній локалізованих геометричних недосконалостей.

Для дослідження механіки пружного згинання бурильних колон у криволінійних свердловинах з локалізованими геометричними недосконалостями використовувались методи будівельної механіки гнучких криволінійних стержнів; методи диференціальної геометрії та теорії поверхонь; основні положення теорії механічних систем із зв'язями, що обмежують їх переміщення; числовий метод Рунге-Кутти.

Створено математичне забезпечення для аналізу цих явищ. Воно дозволяє будувати траєкторію свердловини, що забезпечує найменші значення сил опору переміщенню бурильної колони, і підбирати найменш енергоємні та безпечні режими буріння. Наведено результати комп'ютерного моделювання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БУРИЛЬНА КОЛОНА, КРИВОЛІНІЙНА СВЕРДЛОВИНА, СПІРАЛЬНІ НЕДОСКОНАЛОСТІ, БЕЗПЕЧНІ РЕЖИМИ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

Gulyayev V.I., Andrusenko E.N., Levkivska L.V. Minimization of resistance forces in axial motion of a drill string in a curve bore-hole. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

The problem of computer simulation of mechanical behavior of drill strings in hyper deep vertical, inclined and horizontal bore-holes is stated with the aim of forecasting the possible initiation of emergency situations during carrying out drilling operations. The software for study of these effects is elaborated.

The investigation object is the phenomenon of the drill string deforming in the channels of super deep curvilinear and horizontal bore-holes with geometric imperfections during drilling and ascending – descending operations.

To analyze mechanics of elastic bending of drill strings in curvilinear bore-holes with localized imperfections the methods of structural mechanics, theory of curvilinear flexible rods, differential geometry and surface theory are used.

The elaborated software permits one to construct the bore-hole trajectory securing the smallest values of resistance forces and to choose the least energy-consuming and safe regimes of drilling. It ensures also the possibility to determine the requirements for the necessary accuracy of the bore-hole drivage and for the acceptable geometrical distortions and imperfections.

KEYWORDS: DRILL STRING, DEVIATED BORE-HOLE, SPIRAL IMPERFECTIONS, SAFE REGIMES, COMPUTER SIMULATION.

РЕФЕРАТ

Гуляев В.И. Минимизация сил сопротивления при осевом движении бурильной колонны в криволинейной скважине / В.И. Гуляев, Е.Н. Андрусенко, Л.В. Левковская // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

В статье рассмотрена задача компьютерного моделирования механического поведения бурильных колонн в сверхглубоких наклонно-направленных и горизонтальных скважинах и прогнозирования возможного возникновения нештатных ситуаций в режимах бурения и выполнения спуско-подъемных операций.

Объект исследования – явление упругого деформирования бурильной колонны в канале криволинейной скважины с геометрическими несовершенствами при выполнении технологических операций бурения.

Цель работы заключается в постановке и решении новых задач строительной механики о нелинейном деформировании бурильных колонн в глубоких наклонно-направленных и горизонтальных скважинах с учетом наличия в траекториях их осевых линий локализованных геометрических несовершенств.

Для исследования механики упругого изгиба бурильных колонн в криволинейных скважинах с локализованными геометрическими несовершенствами использовались методы строительной механики гибких криволинейных стержней; методы дифференциальной геометрии и

теории поверхностей; основные положения теории механических систем со связями, ограничивающие их перемещения; численный метод Рунге-Кутты.

Создано математическое обеспечение для анализа этих явлений. Оно позволяет строить траекторию скважины, обеспечивающую наименьшие значения сил сопротивления перемещению бурильной колонны, и подбирать наименее энергоемкие и безопасные режимы бурения. Приведены результаты компьютерного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, КРИВОЛИНЕЙНАЯ СКВАЖИНА, СПИРАЛЬНЫЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА, БЕЗОПАСНЫЕ РЕЖИМЫ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

АВТОРИ:

Гуляев Валерій Іванович, доктор технічних наук, Національний транспортний університет, завідувач кафедри вищої математики, професор, e-mail: valery@gulyayev.com.ua , тел. +380667153633, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 508.

Андрусенко Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: a.andrusenko@gmail.com , тел. +380672981387, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

Левківська Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: l_v_g@ukr.net, тел. +380975475724, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 514.

AUTHORS:

Gulyayev Valery Ivanovich, Doctor of Science (Technology), National Transport University, associate professor department of high mathematics, , e-mail: valery@gulyayev.com.ua , tel. +380667153633, Ukraine, 01010, Kiev, Kikvidze str. 42, of. 508.

Andrusenko Elena Nikolaevna, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: a.andrusenko@gmail.com , tel. +380672981387, Ukraine, 01010, Kiev, Kikvidze str. 42, of. 511.

Levkivska Liudmyla Volodymyrivna, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, , e-mail: l_v_g@ukr.net, тел. +380975475724, Ukraine, 01010, Kiev, Kikvidze str. 42, of. 514.

АВТОР:

Гуляев Валерий Иванович, доктор технических наук, Национальный транспортный университет, заведующий кафедрой высшей математики, профессор, e-mail: valery@gulyayev.com.ua , тел. +380667153633, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 508.

Андрусенко Елена Николаевна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: a.andrusenko@gmail.com, тел. +380672981387, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

Левковская Людмила Владимировна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: l_v_g@ukr.net, тел. +380975475724, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 514.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

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

Рассказов О.О., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Gaidaichuk V.V., Engineering (Dr.), professor, Kiev National University of Construction and Architecture, professor, department of theoretical mechanics, Kiev, Ukraine.

Rasskazov O.O., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, professor, department of theoretical mechanics, Kiev, Ukraine.