

УДК 539.3
UDC 539.3

УТОЧНЕНА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ЗГИНАННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ПРИ ЇЇ ОСЬОВОМУ Й ОБЕРТАЛЬНОМУ РУХАХ

Андрусенко О.М., Національний транспортний університет, Київ, Україна

IMPROVED "DRAG AND TORQUE" MODEL FOR COMPUTER SIMULATION OF DRILL STRING BENDING

Andrusenko E.N., National Transport University, Kiev, Ukraine

УТОЧНЁННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗГИБАНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ ЕЁ ОСЕВОМ И ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИЯХ

Андрусенко Е.Н., Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми.

Однією з найважливіших технологічних компонент видобутку вуглеводневих палив є буріння глибоких вертикальних і похило - скерованих свердловин. Проте їх проходка пов'язана зі значними труднощами, зумовленими постійною змінністю балансу сил гравітації, сил опору (сил тертя), сил інерції та сил пружності, що діють на долото і бурильну колону, а також моментів цих сил [1, 2]. Тому при бурінні криволінійних свердловин все ще високим залишається число позаштатних ситуацій і аварій. Все це робить проблему комп'ютерного моделювання процесів руху і пружного деформування бурильних колон у каналах криволінійних свердловин досить актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На ранніх етапах розробки технологій буріння криволінійних свердловин розглядалися, як правило, свердловини найпростіших геометричних обрисів з малими викривленнями їх осьових ліній. У таких свердловинах згинні деформації колон, як правило, невеликі і ними можна було знехтувати. У цих випадках бурильна колона моделювалася нерозтяжною ниткою, а осьова лінія свердловини умовно розбивалася на ряд прямолінійних або кругових ділянок або сегментів ланцюгових ліній ("soft string" model) [3, 4].

З розвитком технологій буріння криволінійних свердловин вони стали набувати більш складну геометрію, їх глибини збільшувалися, а горизонтальні віддалення від бурильної установки перевищували 12 км. Природно, що процес буріння таких свердловин, пов'язані з ним енерговитрати і супроводжуючі його нештатні ситуації виявляються набагато чутливішими до помилок, що допущені при проектуванні свердловини, а також до геометричних недосконалостей її осьової лінії, неминучими при їх проходці. При цьому особливу небезпеку представляють короткохвильові геометричні недосконалості з малими радіусами кривини, оскільки вони призводять до збільшення внутрішніх згинальних моментів у бурильній колоні, що викликають зростання сил контактної і фрикційної взаємодії між колоною і стінками свердловини [5].

У роботах [6 - 8] для аналізу цих явищ запропоновано новий підхід до дослідження цих процесів, заснований на використанні теорії гнучких криволінійних стержнів ("stiff string" model). Показано, що локалізовані геометричні недосконалості навіть з порівняно малими амплітудами можуть призводити до значного збільшення сил опору при виконанні спуско- підйомних операцій і навіть бути причиною прихоплення БК. Встановлено також, що суміщенням осьового і обертального руху БК можна істотно зменшувати сили опору при виконанні спуско- підйомних операцій і уникати прихоплень.

Мета роботи полягає в виконанні комп'ютерного аналізу впливу локалізованих геометричних недосконалостей на значення сил опору осьовому переміщенню бурильної колони при виконанні технологічних операцій буріння; провести 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 прихоплень.

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 осью 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 в параметричній формі

$$\rho = \rho(s), \quad (1)$$

де ρ – диференційовна вектор-функція $\rho = xi + yj + zk$, що 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 [2]

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

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 [7]

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

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).

Розв'язок рівнянь (5) при заданих початкових умовах дозволяє побудувати функції $F_\tau(s)$, $M_\tau(s)$ і знайти значення осьової сили $F_\tau(S_i)$ й крутного моменту $M_\tau(S_i)$, які повинні бути прикладені в точці підвісу БК для виконання необхідного технологічного режиму для обраного відношення η між швидкостями обертального (ωr) і осьового (\dot{w}) рухів. Як свідчать наші

теоретичні результати, при цьому значення параметра η істотно впливає на можливість виконання запланованої операції [6, 7]. Так, збільшення параметра η призводить до збільшення $M_r(S_i)$ і зменшення $F_r(S_i)$ і навпаки, можна збільшувати $F_r(S_i)$, зменшуючи η .

Зазначена можливість зміни $F_r(S_i)$, $M_r(S_i)$, і керування технологічним процесом за рахунок зменшення параметра η на кожному кроці дозволяє не тільки передбачити і уникнути позаштатні ситуації та аварії, але також вибрати найменш енергоємні режими процесу буріння. Дійсно, прийемо, що реальна геометрія і допущені недосконалості, виміряні методами каротажного зондування, відомі. Тоді робота dW , виконана на елементарному відрізку ds , може бути представлена у формі

$$dW = F_r(S)ds + M_r(S)d\varphi. \quad (6)$$

Після розв'язання системи (5) при іншому значенні η , зробленому для вимірних геометричних недосконалостей, виберемо величину η_i , яка забезпечує мінімальне значення dW_i для розглянутого режиму і довжини S_i . У цьому випадку значення ω_i вибираються, виходячи з технологічних даних і можливостей приводу бурильної установки.

Відзначимо, що запропонований підхід може бути використаний як на етапі проектування свердловини, так і при її проходці. У першому випадку гіпотетичні параметри траєкторії свердловини і недосконалостей можуть варіюватися в широких межах, виходячи з технологічних можливостей їх реалізації. У другому випадку задаються реальні величини цих параметрів, які встановлені в результаті електро-каротажного зондування.

Енергозберігаючий режим при підйомі БК в свердловині зі спіральними недосконалостями. Нехай спочатку траєкторія свердловини запроєктована як частина ідеальної гіперболічної кривої, як показано на рис. 1а. Проте насправді не представляється можливим забезпечити точно заплановане обрис осьової лінії і, як правило, на практиці деякі спотворення вносяться до її геометрії. Однією з найбільш поширених форм недосконалостей, що зустрічаються на практиці, є локалізована тривимірна спіраль. Її крок $\lambda = 2\pi/k$ визначається хвильовим числом k , яке приймається рівним константі (Рис. 1б), і радіус $h(s)$ задається максимальним значенням h_c в точці $s = s_c$.

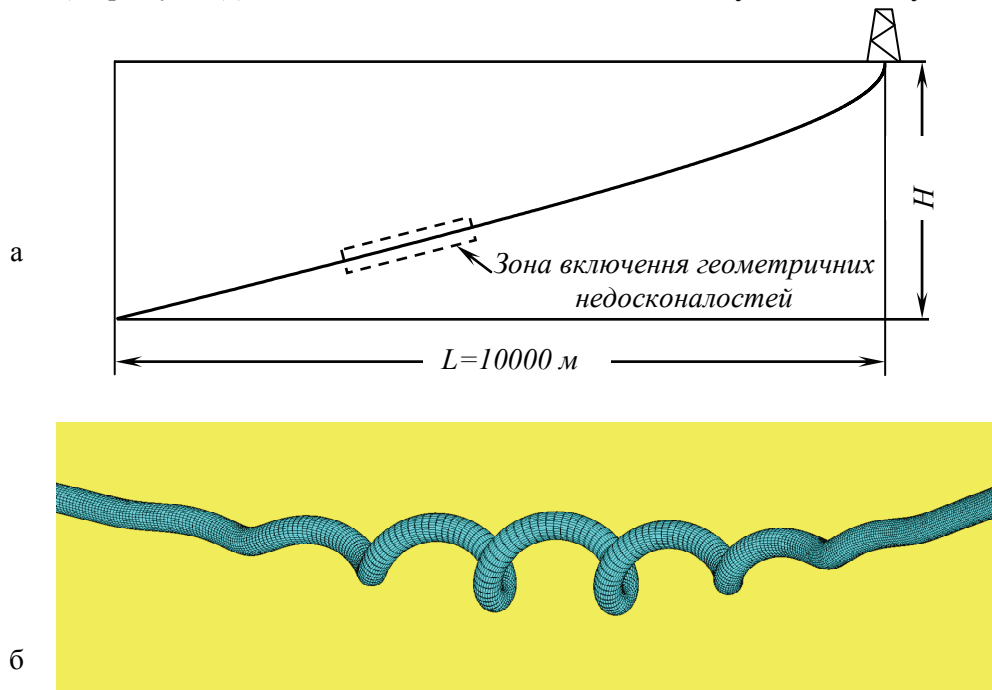


Рисунок 1 – Геометрична схема глибокої похило-скерованої свердловини

Результати досліджень.

За допомогою запропонованого підходу розглянуто задачу про вибір енергозберігаючої операції підйому БК в свердловині з локалізованими спіральними недосконалостями.

При проектуванні геометрії свердловини і технології її проходки доводиться враховувати велику різноманітність визначальних чинників, включаючи віддалення по горизонталі від бурильної установки (які перевищують 12 км.), глибину (більше 4 км.), обрис свердловини (у розглянутому випадку – гіпербола) і можливу наявність геометричних недосконалостей. Нижче розглянемо випадок, коли проектна гіпербола задана в області $3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi$ та визначена параметрами $H = 4000$ м, $L = 10000$ м і $\varepsilon = 3$. Спіральні недосконалості амплітудою $h_c = 2$ м і кроком $\lambda = 109$ м накладені на траєкторію гіперболи. Прийнято, що їх центр локалізований в точці $S_c = 3S/8$. Тут S - довжина осьової лінії свердловини.

У нашому аналізі обрано такі значення визначальних факторів: m , товщина труби БК $\delta = 0.01$ м, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\gamma_t = 7850$ кг/м³, $\gamma_l = 1500$ кг/м³, $r = 0,08415$ м і коефіцієнт тертя $\mu = 0,2$.

Спочатку розглянемо вплив прийнятих недосконалостей на функції осьової сили $F_\tau(s)$ (Рис. 2а) і крутного моменту $M_\tau(s)$ (Рис. 2б) при $\eta = 1$. Криві 1 на цих діаграмах відповідають проектній свердловині з ідеальною геометрією, криві 2 представляють випадок викривленої свердловини.

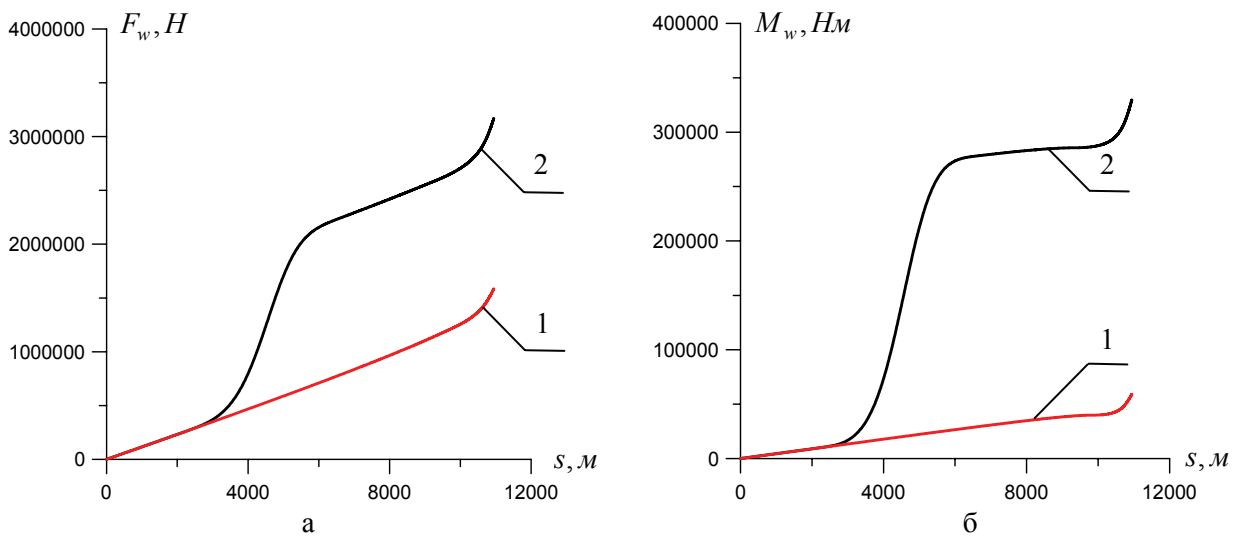


Рисунок 2 – Функції поздовжньої сили F_w (а) і крутного моменту M_w (б) (спіральні недосконалості; операція підйому)

На базі заданої геометрії вирішена проблема для рівнянь (5) для випадку заданої геометрії S_i і при різних значеннях відношення $\eta = \omega r / \dot{w}$ між швидкостями обертального (ωr) і осьового (\dot{w}) рухів. Обрані значення η_i , які мінімізують елементарну роботу (6). Для мінімізації енергетичних витрат при виконанні операції підйому на кожній стадії оптимізаційного аналізу був використаний метод перебору. При проведенні цього моделювання довжина БК розбивалася на 10 рівних відрізків $\Delta S_i = S/10$ ($i = 1, 2, \dots, 10$), які відділялися один за іншим від довжини колони, імітуючи операцію її підйому. На Рис.3 представлена діаграма зміни знайдених значень η_i .

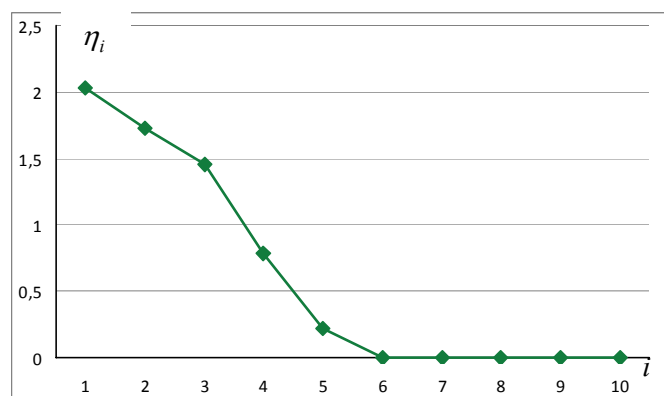


Рисунок 3 – Графік зміни параметра η_i при виконанні операції підйому бурильної колони

З цієї ілюстрації випливає, що найменший опір руху БК на її повній довжині досягається, коли $\eta \approx 2,033$. Однак у міру підйому БК необхідність в обертанні системи зменшується і після проходження кінцем БК зони недосконалостей стає можливим піднімати її без обертання, оскільки $\eta_i \approx 0$.

Необхідно відзначити, що запропоноване математичне забезпечення дозволяє також здійснювати комп'ютерний моніторинг та технологічної операції 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 осьового 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. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. J. Petr. Sci. Eng. 2011. No. 78. P. 759 – 764.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque / drag model? SPE Drilling & Completion. 2009. P. 62 – 7. March.

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. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. J. Petr. Sci. Eng. 2011. No. 78. P. 759 – 764.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Mitchell R.F., Samuel R. How good is the torque / drag model? SPE Drilling & Completion. 2009. P. 62 – 7. March.

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. Problems of Strength. 2013. No. 3. P. 120 – 134.(Rus).

РЕФЕРАТ

Андрусенко О.М. Уточнена комп'ютерна модель згинання бурильної колони при її осьовому й обертальному рухах / О.М. Андрусенко // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2013. – Вип. 28.

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.

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: КРИВОЛІНІЙНА СВЕРДЛОВИНА, “SOFT-STRING” МОДЕЛЬ, “STIFF-STRING” МОДЕЛЬ, СПІРАЛЬНІ НЕДОСКОНАЛОСТІ, БЕЗПЕЧНІ РЕЖИМИ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

Andrusenko E.N. Improved “drag and torque” model for computer simulation of drill string bending. Visnyk National Transport University. – Kyiv. National Transport University. 2013. – Vol. 28.

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 phenomena is elaborated.

The elaborated software permits one to construct its 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: DEVIATED BORE-HOLE, “SOFT-STRING” MODEL, “STIFF-STRING” MODEL, SPIRAL IMPERFECTIONS, SAFE REGIMES, COMPUTER SIMULATION.

РЕФЕРАТ

Андрусенко Е.Н. Уточнённая комп'ютерная модель изгиба бурильной колонны при её осевом и вращательном движениях / Е.Н. Андрусенко // Вестник Национального транспортного университета. – К. : НТУ, 2013. – Вып. 28.

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-подъёмных операций.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КРИВОЛИНЕЙНАЯ СКВАЖИНА, “SOFT-STRING” МОДЕЛЬ, “STIFF-STRING” МОДЕЛЬ, СПІРАЛЬНЫЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА, БЕЗОПАСНЫЕ РЕЖИМЫ, КОМП'ЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

АВТОР:

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

AUTHOR:

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

АВТОР:

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

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.