

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ГЛАЗУНОВ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 539.3

**КВАЗІСТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ФРИКЦІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ
БУРІННІ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН**

05.23.17 – будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного транспортного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гуляєв Валерій Іванович,
Національний транспортний університет,
завідувач кафедри вищої математики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Іванченко Григорій Михайлович,
Київський національний університет будівництва і
архітектури, професор кафедри будівельної механіки,
декан будівельного факультету

кандидат технічних наук
Фернаті Павло Вікторович,
Інститут механіки НАН України, старший науковий
співробітник відділу механіки повзучості

Захист відбудеться „_____” _____ 2018 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, зал засідань (ауд. 333).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного транспортного університету (01103, Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42).

Автореферат розісланий „_____” _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. На даний час в енергетиці, промисловості та бізнесі досить різко ставляться проблеми, пов'язані з видобутком та перерозподілом нафто-газових ресурсів. Додаткове загострення в цю ситуацію внесла «сланцева революція», реалізована завдяки створенню нових технологій гідророзриву та надглибокого і наддалекого криволінійного буріння. Вони розвиваються, однак, так швидко, що науковий супровід не встигає їх обгрунтовувати. Тому при проходці криволінійних свердловин зростають ризики виникнення нештатних та аварійних ситуацій. Вони пов'язані з суттєвим ускладненням балансу розподілених сил на криволінійних ділянках свердловини, оскільки, зазвичай, їх траєкторії мають суттєві невідповідності хвилястості, які зумовлюють додаткове примусове згинання бурильної колони, а також генерування інтенсивних розподілених контактних та фрикційних сил опору її переміщенню. Теоретичне моделювання цих ефектів ускладнюється тим, що геометрія осьової лінії свердловини не описується аналітичними залежностями, а задається у вигляді комбінації відрізків прямих і дуг кіл, або представляється у дискретній формі за даними свердловинної навігації. Тому в бурильних технологіях негативні прояви сил тертя досліджені недостатньо. Слабко вивчені також виявлені на практиці явища торсійних автоколивань бурильних колон при їх обертанні, які самозбурюються під дією нелінійних сил кулонового та в'язкого тертя. Оскільки явища пружного статичного та динамічного згинання бурильної колони в каналі скерованої свердловини описуються методами теорії гнучких криволінійних стержнів, для їх теоретичного моделювання повинні застосовуватись принципи будівельної механіки. Враховуючи, що у зв'язку із збільшенням глибини і дальності проходки свердловин їх вартість постійно збільшується і аварійність зростає, а надійних методик теоретичного моделювання їх буріння на даний час не розроблено, можна зробити висновок наскільки **актуальною** є проблема теоретичного прогнозування критичних станів бурильних колон, викликаних фрикційними ефектами, і яка ціна помилок таких прогнозів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно плану науково-дослідних робіт кафедри вищої математики Національного транспортного університету, а також в рамках держбюджетних тем №11 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і шельфових зонах морських акваторій» (2012 – 2014 рр., номер державної реєстрації 0112U000137) і № 38 «Комп'ютерне прогнозування і запобігання аварійним режимам буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин на етапах їх проектування і проходки» (2015 – 2017 рр., номер державної реєстрації 0115U002270).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці механічних та математичних моделей квазістатичних та динамічних процесів фрикційної взаємодії пружних бурильних колон із стінками прямолінійних і криволінійних глибоких свердловин та прогнозування з їхньою допомогою можливих нештатних ситуацій.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступне:

- методами будівельної механіки криволінійних стержнів і диференціальної геометрії створити математичну модель пружного деформування бурильної колони в криволінійній свердловині;
- методами сплайнової інтерполяції перейти від табличної форми задання геометрії осьової лінії свердловини, побудованої методами свердловинної навігації, до аналітичної форми;
- створити обчислювальний комплекс для комп'ютерного моделювання контактних фрикційних сил опору руху бурильної колони у каналі свердловини;
- методами комп'ютерного моделювання встановити загальні закономірності виникнення квазістатичних і автоколивальних позаштатних ситуацій, обумовлених дією сил тертя.

Об'єктом дослідження є явища квазістатичної та динамічної фрикційної взаємодії пружних бурильних колон зі стінками криволінійних хвилястих свердловин при виконанні технологічних операцій буріння.

Предметом дослідження є значення геометричних, кінематичних і силових параметрів свердловин і процесів буріння, які впливають на генерування квазістатичних та динамічних фрикційних ефектів та викликаних ними статичних та динамічних позаштатних ситуацій.

Методи дослідження. Задача про пружне деформування бурильних колон в криволінійних свердловинах сформульована за допомогою методів будівельної механіки, теорії гнучких криволінійних стержнів, методів диференціальної геометрії, теорії в'язкого та сухого тертя і методів сплайн апроксимації. Розв'язання нелінійних систем диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами здійснювалось методом Рунге-Кутти.

Достовірність результатів досліджень підтверджувалася обґрунтованим вибором розроблених механічних моделей, заснованих на базових положеннях будівельної механіки, теорії гнучких криволінійних стержнів і методах прикладної математики, комп'ютерною перевіркою збіжності результатів обчислень, відповідністю встановлених ефектів загальним закономірностям поведінки стержневих систем, зіставленням отриманих результатів з результатами розв'язків інших авторів, які знайдені на основі інших, більш спрощених математичних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Поставлена нова задача про комп'ютерне моделювання квазістатичних та динамічних фрикційних ефектів у каналах криволінійних хвилястих свердловин, геометрія осьових ліній яких описана в табличному вигляді за проектними даними або результатом геодезичних вимірів. Методом сплайн інтерполяції виконаний перехід від дискретної форми представлення геометрії до аналітичної, побудована система звичайних диференціальних рівнянь, яка описує згинальні коливання бурильної колони з врахуванням сил контактного та фрикційного опору її осьовому руху з обертанням. Розроблене програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання пружного згинання бурильної колони та сил опору її руху, які генеруються.

2. Вперше виконане комп'ютерне моделювання осьового руху з обертанням бурильної колони в порожнині криволінійної хвилястої свердловини. Показано, що рекомендації, які використовуються на практиці, щодо з'єднання різних ділянок траєкторії свердловини дугами кола, призводять до збільшених величин сил фрикційного опору їх руху. Вперше показано, що з'єднання їх елементами спіралей Корню або кубічних парабол (як це робиться під час трасування колій залізних та автомобільних доріг) призводить до суттєвого зниження сил опору. Ця пропозиція запатентована.

3. Побудована нова модель смозбурення торсіонних коливань бурильної колони з врахуванням діючих на неї сил в'язкого тертя промивної рідини. В результаті комп'ютерного моделювання показано, що переходи від стаціонарних обертань колони до її автоколивань кручення реалізуються через біфуркаційні стани.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані результати дисертації можуть бути використані у вигляді комп'ютерного математичного забезпечення під час проектування та буріння глибоких криволінійних свердловин. За допомогою розробленого підходу можна підібрати раціональні траєкторії криволінійних свердловин та режими буріння, які мінімізують негативний вплив сил фрикційного опору і ризику виникнення нештатних ситуацій.

Результати наукових досліджень використовуються у ПАТ "УКРГАЗВИДОБУТОК" при проектуванні та розрахунках відповідальних конструкцій бурильного обладнання, що піддаються впливу інтенсивних поздовжніх сил, сил тертя і крутних моментів. Вони будуть застосовуватись ПАТ "УКРГАЗВИДОБУТОК" також на етапах проектування траєкторій свердловин та їх проходки.

Результати дисертаційної роботи можуть бути також використані на інших підприємствах нафтової, газової та вугільної промисловостей України при проектуванні технологій прокладання досить глибоких криволінійних свердловин.

Розроблені в дисертаційній роботі методи комп'ютерного моделювання пружного деформування криволінійних стержнів впроваджені в навчальний процес на кафедрі опору матеріалів та машинознавства Національного транспортного університету при викладанні курсу з будівельної механіки стержневих конструкцій. На спосіб зменшення сил тертя за рахунок раціонального спряження секцій свердловини отримано патент.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати досліджень були отримані автором самостійно. Дисертанту належать аналітичні викладки та числова комп'ютерна реалізація розв'язування задач моделювання. В монографії [42] дисертант підготував глави 4 та 6. У роботах [19, 22, 25, 28, 30, 106, 108, 109, 111, 114, 116, 117, 118] В.І. Гуляєв брав участь у постановці задач та обговоренні отриманих результатів. У роботах [13, 14, 18, 22, 108, 116, 117] співавтором О.В. Глушаковою надана допомога у розробці та налаштуванні обчислювального комплексу для проведення комп'ютерного моделювання автоколивальних процесів. У роботах [4, 30, 111] співавтором О.М.

Андрусенко надана допомога у розробці та налаштуванні обчислювального комплексу для проведення комп'ютерного моделювання фрикційного опору. В роботах [22, 25, 105, 109] співавтори О.В. Вашіліна, В.В. Гайдайчук, І.В. Лебедева, П.З. Луговий та Н. Муса брали участь в обговоренні одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що включені в дисертацію, були представлені на наступних міжнародних наукових конференціях:

- Celle Drilling, (Germany, 14-15 September at Congress Union Celle, 2015).
- International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering. Institute of Research Engineers and Doctors. USA. Zurich, Switzerland, 02-03 September, 2017.
- 8th European Nonlinear Dynamics Conference, Vienna, Austria, July 6 – 11, 2014.
- Fourth International Conference “Nonlinear Dynamics”, Sevastopol, Ukraine, June, 19 – 22, 2013.
- Fifth International Conference “Nonlinear Dynamics”, Kharkiv, Ukraine, September, 27 – 30, 2016.
- 11-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові, - Львів, 12 – 15 травня 2013.
- Актуальные проблемы инженерной механики, III Международная научно-практическая конференция (Одесса: «Внешрекламсервис», травень 2016).

Результати дисертаційної роботи доповідались також на:

- LXIX, LXXI – LXXIII щорічних науково-практичних конференціях науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету, Київ, 2013, 2015 – 2017 рр.

Тези доповідей опубліковані у матеріалах зазначених конференцій.

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 28 публікаціях [4, 13-19, 22, 28, 30, 42, 105, 106, 108, 109, 111, 114, 116-118]: з них 1 монографія, 7 статей у наукових періодичних виданнях іноземних держав або у виданнях України, включених до міжнародних наукових баз, 8 робіт опубліковано у фахових виданнях, 7 – в тезах міжнародних конференцій, 4 – в збірниках тез наукових конференцій Національного транспортного університету та 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 163 найменування. Вона містить 201 сторінку друкованого тексту, 9 таблиць, 99 рисунків. Повний обсяг дисертації складає 210 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. В ньому наведено відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі представлено результати аналізу квазістатичних та динамічних нештатних ситуацій, зумовлених фрикційними ефектами при бурінні глибоких вертикальних та похило-скерованих свердловин. Показано, що в процесі виконання технологічних операцій бурильна колона знаходиться під дією складної

комбінації статичних, динамічних та кінематичних навантажень, які включають сили тяжіння, контактні сили, сили і моменти сил контактного тертя, сили в'язкого тертя у промивній рідині, момент сил тертя (різання) долота об породу, що руйнується, сили інерції обертальних та коливальних рухів та інші. Особлива роль у цій комбінації належить силам тертя, оскільки вони погіршують провідність крутного моменту від приводного механізму до долота, призводять до зростання внутрішніх осьових сил та моментів у колоні, збільшенню енерговитрат та зношуванню колони. Дія цих сил може супроводжуватись самозбуренням інтенсивних торсіонних та згинальних коливань, колона може руйнуватися або може відбутися її прихват.

Моделювання цих ефектів повинне здійснюватися методами будівельної механіки з залученням теорії гнучких криволінійних стержнів. Різні аспекти цієї теорії розглядали Н.І. Амел'кін, В.Л. Бідерман, В.З. Власов, В.В. Гайдайчук, В.І. Гуляєв, В.М. Гордєєв, Г.М. Іванченко, О.О. Ілюхін, В.В. Кулябко, П.З. Луговий, О.С. Лимарченко, А.В. Перельмутер, Е.П. Попов, В.О. Світлицький, В.І. Феодосєєв, А.П. Філіпов, Г. Циглер, О.В. Шимановський, S.S. Antman, H. Ashley, I. Elishakov, G. Naviland, S.P. Timoshenko та інші вчені.

Пружне згинання та колювання бурильних колон у глибоких свердловинах методами будівельної механіки вивчали О.М. Андрусенко, Ю.М. Басаргін, О.В. Глушакова, В.І. Гуляєв, Е.Г. Керімов, М.А. Мислюк, А.А. Молчанов, В. S. Aadnoy, J. J. Bailey, E. J. Berger, F. J. Brett, C. A. Brockley, N. Challamel, A. P. Christoforou, J. C. Cunha, J. D. Jansen, A. Lubinski, N. Mihajlovic, R. F. Mitchell, M.A. Mohiuddin, R. Samuel, S. J. Sawaryn, M. C. Sheppard, R.W. Tucker, K. J. Vandiver та інші вчені.

Однак зазначено, що всі ці дослідження виконані на основі спрощених моделей геометрії криволінійних свердловин та фрикційних впливів на колону. Зроблено висновок про те, що тема дисертаційної роботи, напрямлена на моделювання критичних квазістатичних та динамічних станів бурильної колони в каналі глибокої хвилястої свердловини з врахуванням дискретно заданої геометрії її траєкторії та супутніх фрикційних ефектів, є актуальною.

У другому розділі побудована нова інтерполяційна тривимірна модель бурильної колони для аналізу її пружного згинання та фрикційних сил в свердловині з неупорядкованими хвилястостями.

Оскільки отримані в результаті геофізичних досліджень дані про геометрію стовбура свердловини представляються у табличній (дискретній) формі, а моделі stiff string drag and torque model базуються на використанні аналітичних представлень (неперервних функцій) про її геометрію, при моделюванні необхідно від дискретної форми задання геометрії перейти до континуальної. Такий перехід здійснюється за допомогою методів сплайнової інтерполяції.

Нехай при проектуванні свердловини або в результаті геофізичних вимірів при її прокладанні сформована таблиця значень координат $x_i = x(S_j)$, $y_i = y(S_j)$, $z_i = z(S_j)$ її точок N з кроком $\Delta S = S/(N-1)$, де S – повна довжина осьової лінії свердловини. Потрібно методами теорії гнучких криволінійних стержнів вивести диференціальне рівняння квазістатичної рівноваги бурильної колони при її русі та підрахувати внутрішні сили у колоні, а також розподілені контактні сили та сили

тертя, які перешкоджають її руху. Для цього спочатку необхідно визначити всі геометричні характеристики траєкторії свердловини. Вони визначаються ортами $\mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{t}$ рухомого тригранника Френе, кривизною k_R та скрутом k_T . Для їх обчислення на всій довжині S осьової лінії вводиться натуральний параметр s у межах $0 \leq s \leq S$. Потім за допомогою кубічних сплайнів за відомими дискретними значеннями $x(S_j), y(S_j), z(S_j)$ задаються аналітичні функції $x(s), y(s), z(s)$ в межах кожного відрізка ΔS і визначаються функції $\mathbf{n}(s), \mathbf{b}(s), \mathbf{t}(s)$. Вони обчислюються за формулами

$$\mathbf{t} = d\boldsymbol{\rho}/ds = \boldsymbol{\rho}', \quad \mathbf{n} = R d\mathbf{t}/ds = R\mathbf{t}', \quad \mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n}. \quad (1)$$

Тут та надалі штрихом позначається диференціювання по s ,

Радіус кривизни R обчислюється як геометрична характеристика, обернена до кривизни

$$R(s) = 1/k_R(s) = 1/\sqrt{(x'')^2 + (y'')^2 + (z'')^2}. \quad (2)$$

Для повного визначення осьової лінії свердловини необхідно також ввести поняття її скруту k_T . Воно обчислюється так:

$$k_T = \boldsymbol{\rho}'(\boldsymbol{\rho}'' \times \boldsymbol{\rho}'')/\boldsymbol{\rho}''\boldsymbol{\rho}'''. \quad (3)$$

За допомогою кривизни k_R та скруту k_T вводиться вектор Дарбу

$$\boldsymbol{\Omega} = k_R\mathbf{b} + k_T\mathbf{t}, \quad (4)$$

який визначає величину відмінності даної кривої в даній точці від прямої лінії. Чисельно його можна представити як вектор кутової швидкості повороту тригранника Френе при його русі вздовж кривої з одиничною лінійною швидкістю.

Наведені геометричні характеристики повністю визначають геометрію осьової лінії свердловини. Навіть, враховуючи, що довжина свердловини (та бурильної колони) велика, а зазор між колоною та стінкою свердловини малий, приймемо що їхні осьові лінії співпадають. Тоді можна вважати, що геометричні характеристики (1)-(4) відносяться також до осьової лінії бурильної колони.

При такій постановці задачі на кожному відрізку $[s_{k-1}, s_k]$ кожна функція $P(s)$ є поліномом третьої степені

$$P_k(s) = a_k + b_k(s - s_k) + c_k(s - s_k)^2/2 + d_k(s - s_k)^3/6, \quad (5)$$

у котрого коефіцієнти a_k, b_k, c_k, d_k знаходяться з умов неперервності самої функції $P(x)$, а також її першої та другої похідних.

Зазначені властивості кубічного сплайна роблять його зручним для інтерполяції дискретно (таблично) заданої геометрії криволінійних свердловин, оскільки в цьому випадку неперервною виявляється її кривизна k траєкторії свердловин, яка описується рівністю

$$k(t) = \sqrt{\frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)(\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2) - (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{z}\ddot{z})^2}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)^3}}. \quad (6)$$

Це дає можливість на всьому інтервалі $0 \leq s \leq S$ сформулювати рівняння

$$dF_t/ds = k_R F_n + \gamma t_z \mp \mu f^{koh} a / \sqrt{a^2 + (\omega r)^2}, \quad dM_t/ds = \mp \mu f^{koh} \omega r^2 / \sqrt{a^2 + (\omega r)^2} \quad (7)$$

рівноваги внутрішньої пружної осьової сили F_t , внутрішнього крутного моменту M_t , внутрішньої перерізуючої сили F_n і зовнішньої розподіленої контактної сили $f^{кон}$. Тут μ – коефіцієнт тертя, r - радіус труби колони, a та ω - швидкості осьового руху та кутової швидкості обертання колони.

Розподілена сила $f^{кон}$ контактного тиску, що використовується в (7), визначається своїми компонентами

$$\begin{aligned} f_n^{кон}(s) &= -k_R F_t - k_R k_T M_T - A k_R k_T^2 + A d^2 k_R / ds^2 - f_n^{тяж}, \\ f_b^{кон}(s) &= k_R m_t^{мер} + 2 A k_T dk_R / ds - M_t dk_R / ds + A k_R dk_T / ds - f_b^{тяж}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $f_n^{тяж}$, $f_b^{тяж}$ – компоненти розподіленої сили тяжіння,

$m_t^{мер}$ – розподілений момент сил тертя.

Після обчислення функцій кривизни k_R та скруту k_T за даними сплайн апроксимації, система (7), (8) інтегрується методом Рунге-Кутти і знаходиться сила F_t і момент M_t , а також контактна сила $f^{кон}$ і сила тертя (опору) $\mu f^{кон}$.

У розділі 3 виконане дослідження впливу додаткової хвилястості траєкторії свердловини на напружено-деформований стан колони та фрикційні сили опору в режимах її спуску, підйому та буріння. Для співставлення обрані випадки, коли свердловина має ідеально заплановану траєкторію (рис. 1, а), що описується рівняннями

$$x_0 = a_0(1 + \varepsilon) \cos \vartheta / (1 + \varepsilon \cos \vartheta), \quad y_0 = 0, \quad z_0 = b_0 \sin \vartheta / (1 + \varepsilon \cos \vartheta), \quad (9)$$

де a_0 - відстань по горизонталі від бурової платформи до долота;

b_0 - глибина свердловини;

ε - ексцентриситет гіперболи;

ϑ - безрозмірний параметр.

Їх значення обрані рівними: $a_0 = 8000$ м, $b_0 = 4000$ м; $\varepsilon = 1,5$. Параметр ϑ змінюється у межах $3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi$. При цьому довжина свердловини $S = 9220$ м.

При бурінні свердловини її траєкторія набула додаткової хвилястості, яка після геодезичних вимірів представлена в тривимірній табличній формі. За допомогою сплайнової інтерполяції вона перетворена до аналітичної форми $x = x(s)$, $y = y(s)$, $z = z(s)$ (рис. 1, б), після чого методами диференціальної

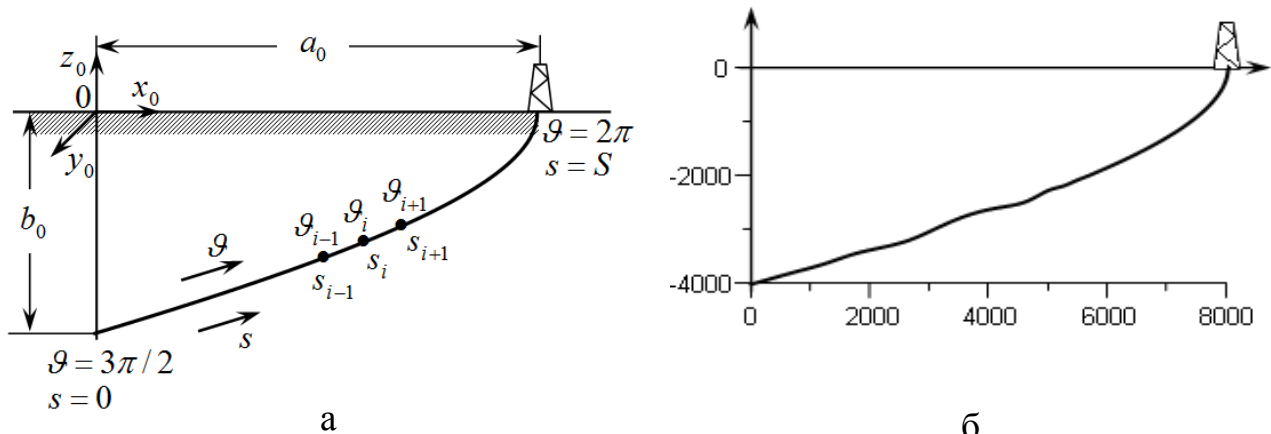


Рисунок 1 – Форми траєкторій криволінійних свердловин: а – запланована ідеальна траєкторія; б – хвиляста траєкторія, побудована методами свердловинної навігації

геометрії в кожній дискретній точці параметра s в області $0 \leq s \leq S$ обчислені компоненти ортів $\mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{t}$, кривизна k_R та скрут k_T . Функції $k_R(s)$ для двох випадків збурення (малого – випадок 1 і великого – випадок 2) показані на рис. 2

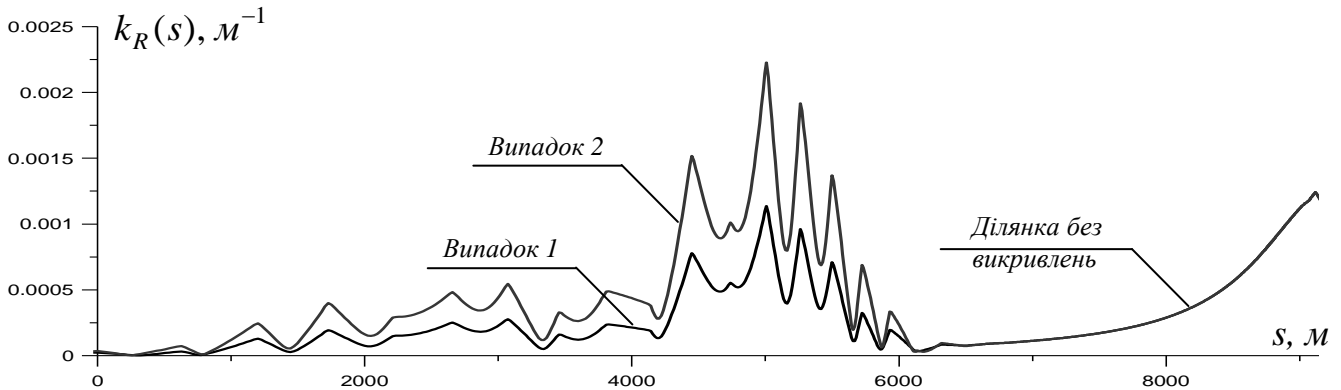


Рисунок 2 – Графіки кривизн $k_R(s)$ осевих ліній, побудованих за таблицею

Побудована геометрія була використана для дослідження зовнішніх та внутрішніх сил, що діють на колону при виконанні операції підйому, спуску та буріння при різних співвідношеннях між швидкостями осевого та колового рухів колони. На рис. 3 показані криві зміни внутрішньої осевої сили $F_t(s)$ та крутного моменту $M_t(s)$ при операції підйому для випадків запланованої ідеальної траєкторії свердловини та траєкторії з хвилястостями, які додані при бурінні.

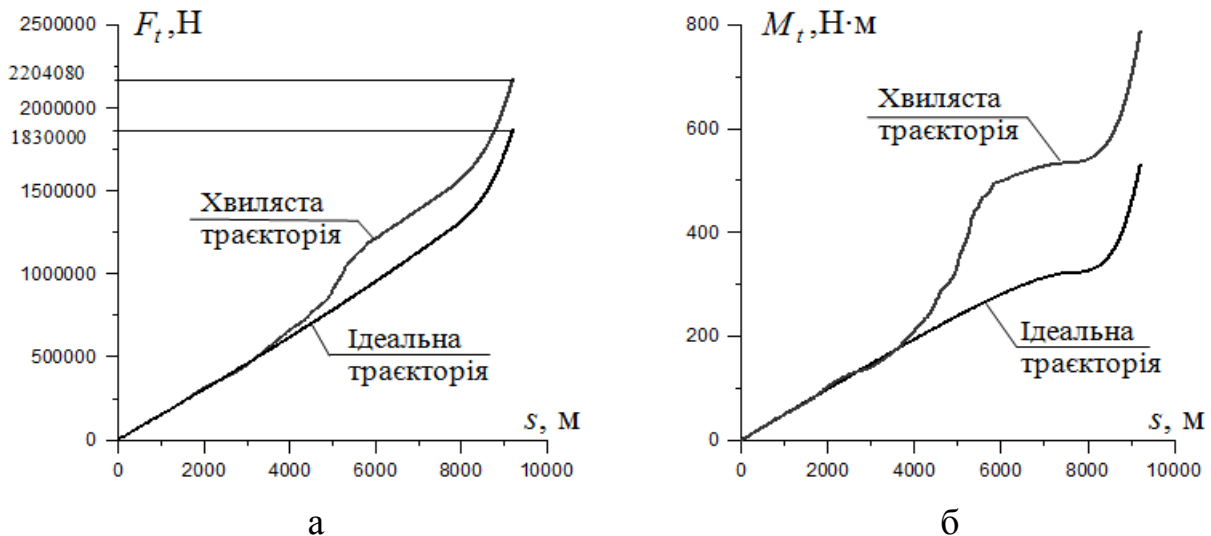


Рисунок 3 – Графіки внутрішньої осевої сили $F_t(s)$ (а) та крутного моменту $M_t(s)$ (б) при виконанні операції підйому

Тут значення цих функцій у верхній точці колони при $s = S = 9220$ м. представляють собою силу $F_t(S)$ і момент $M_t(S)$, які потрібно прикласти до колони, щоб вилучити її з свердловини. Як видно, навіть внесена мала хвилястість призводить до помітного збільшення цих параметрів.

Розроблена методика дозволила також вдосконалити спосіб спряження окремих секцій траєкторій свердловини. В даний час при їх проектуванні рекомендується складати їх з відрізків прямих та дуг кола (рис. 4).

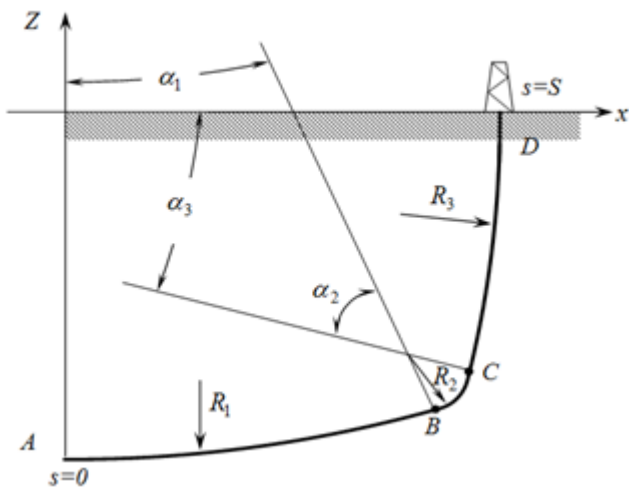


Рисунок 4 – Геометрична схема обрису траєкторії свердловини

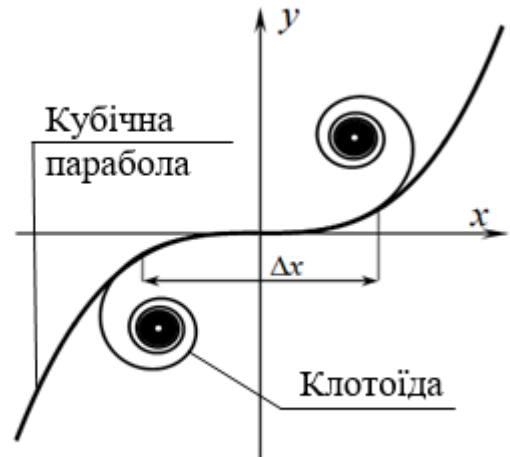


Рисунок 5 – Накладання клотоїди і кубічної параболи при малих Δx

В дисертації показано, що при цьому функція згинального моменту $M(s)$ терпить розрив у точках спряження В та С і в них має місце концентрація контактних сил і сил тертя. Для їх усунення запропоновано виключати розриви кривизни шляхом становлення в цих точках перехідних згладжуючих ділянок в формі дуги клотоїди (рис. 5). Такий підхід використовується при трасуванні колії залізної дороги. Якщо врахувати, однак, що рівняння клотоїди мають непростий вид

$$x(s) = \int_0^s \cos[(as)^2] ds, \quad y(s) = \int_0^s \sin[(as)^2] ds \quad (10)$$

і для малих ділянок Δx абсциси вона співпадає з дугою кубічної параболи (рис. 5), то запропоновано використовувати цю більш просту криву для спряження різних ділянок траєкторії.

Для аналізу впливу згладжування розриву кривизни на сили тертя і опору були розв'язані задачі підйому колони в свердловині, представленій на рис. 4, при різних значеннях R_1 , R_2 , R_3 , коефіцієнта тертя μ , діаметра труби і швидкостях a і ω .

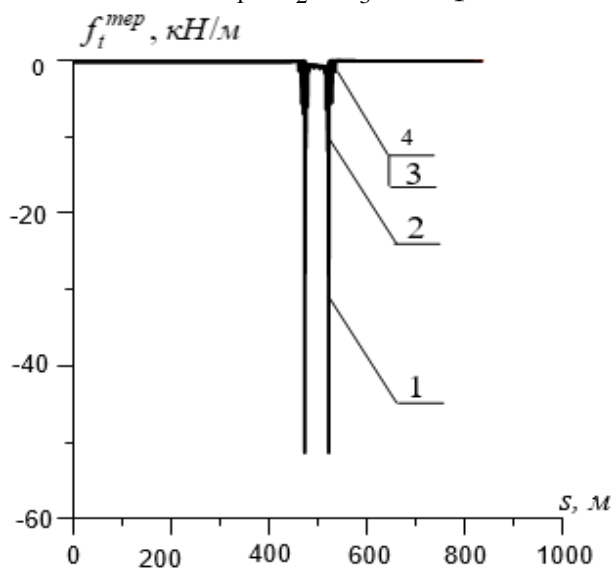


Рисунок 6 – Діаграма функції розподіленої сили тертя

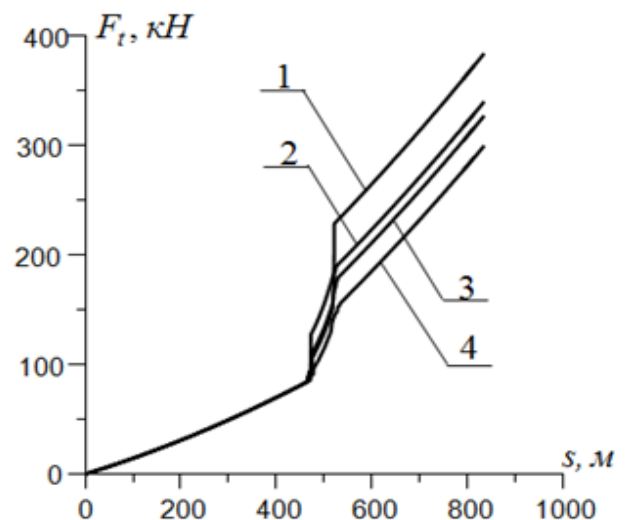


Рисунок 7 – Діаграма функції осьової сили $F_t(S)$

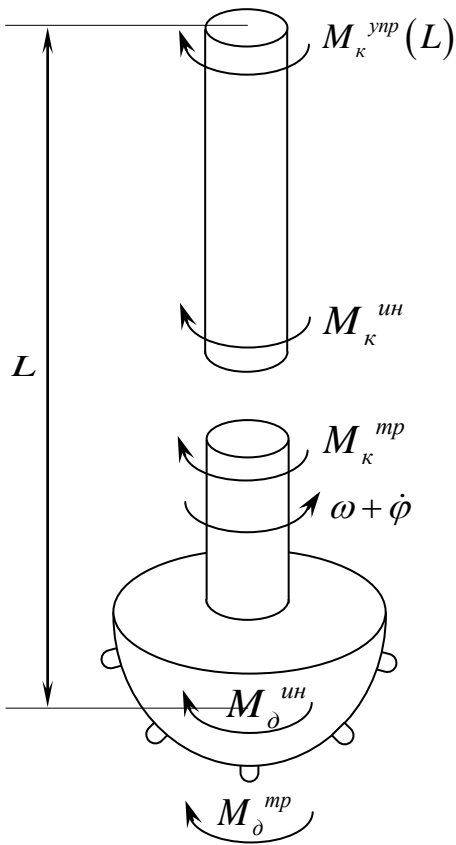


Рисунок 8 – Схема моментів, що діють на колону в дисипативному середовищі

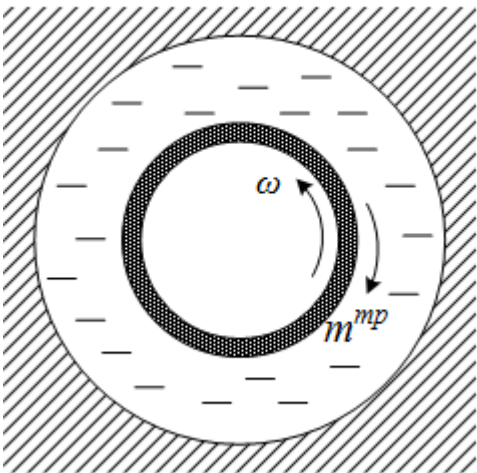


Рисунок 9 – До розрахунку коефіцієнта в'язкого тертя k

На рис. 6 показана функція сили тертя $f_t^{mep}(s)$ для випадку $R_1 = 1800$ м, $R_2 = 48$ м, $R_3 = 1200$ м. Крива 1 реалізується при відсутності згладжуючих відрізків параболи у точках В та С, криві 2 - 4 при довжинах цих відрізків, рівних $2\Delta s$, $5\Delta s$, $10\Delta s$, де $\Delta s = S/1000$, $S = 635$ м. Можна бачити, що сила тертя має різкий сплеск у точках В та С, причому згладжування траєкторії призводить до суттєвого зниження сили тертя (рис. 6) і осьової сили в колоні (рис. 7).

В розділі 4 побудована математична модель самозбурення коливань кручення вертикальної бурильної колони у в'язкому середовищі промивної рідини під дією нелінійних сил фрикційної взаємодії долота з породою, що руйнується (рис. 8). Вихідне рівняння торсійних коливань колони має вигляд

$$GI_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - k(\omega + \frac{\partial \varphi}{\partial t}) - \rho I_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (11)$$

де φ - кут пружного закручування колони,

z - осьова координата,

t - час,

G - модуль пружності при зсуві,

I_z - полярний момент інерції,

ρ - густина,

ω - кутова швидкість обертання колони,

k - зведений коефіцієнт в'язкого тертя.

Значення k визначається у припущенні ламінарної течії промивної рідини між співвісними циліндрами (рис. 9). Воно дорівнює

$$k = 2\mu\pi r_1^2 (r_1^2 + r_2^2) / (r_2^2 - r_1^2), \quad (12)$$

де r_1 , r_2 - радіуси колони і свердловини;

μ - коефіцієнт в'язкості.

Рівняння (11) доповнюється граничною умовою на нижньому кінці $z = L$. Воно виражається у вигляді

$$J \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \Big|_{z=L} + GI_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=L} + M^{mep}(\omega + \varphi) = 0, \quad (13)$$

де J - момент інерції долота,

$M^{mep}(\omega + \varphi)$ - нелінійний момент тертя між долотом і породою.

Рівняння (11) з умовою (13) проінтегровано чисельно за неявною скінченно-різницевою схемою. Його розв'язок показав, що при автоколиваннях функція $\varphi(z, t)$ змінюється лінійно по координаті z у межах $0 \leq z \leq L$. Це дозволило розглянути систему моментів сил інерції M_k^{in} , M_δ^{in} і тертя M_k^{mer} , M_δ^{mer} , що діють на колону та долото (рис. 8) і звести систему (11)–(13) до одного звичайного диференціального рівняння

$$-\left(J + \frac{1}{2}\rho IL\right)\ddot{\varphi}_\delta + M_\delta^{mer}(\omega + \dot{\varphi}_\delta) - k\omega L - \frac{1}{2}kL\dot{\varphi}_\delta - \frac{GI}{L}\varphi_\delta = 0, \quad (14)$$

де φ_δ - кут закручування долота.

Як видно, це рівняння має просту структуру, оскільки коефіцієнти перед шуканою функцією φ_δ , що входить до рівняння, і її похідними $\dot{\varphi}_\delta$, $\ddot{\varphi}_\delta$ є константами. Можлива його складність визначається функцією $M_\delta^{mer}(\omega + \dot{\varphi}_\delta)$, яка, як зазначено вище, залежить від багатьох факторів. До них належать сила притискання долота до дна свердловини, конструкція долота, ступінь зношеності й затуплення його різців, міцність породи, склад промивної рідини й ін. Ці фактори змінюються в міру проходки свердловини, тому навряд чи можливо встановити універсальний вид функції $M_\delta^{mer}(\omega + \dot{\varphi}_\delta)$. Однак можна обрати найбільш типові форми цієї функції з метою аналізу загальних закономірностей процесу генерування автоколивань долота й режимів його протікання. Дослідження, представлені тут, проведені при значеннях параметрів, використаних раніше. Вони відрізняються лише врахуванням моменту сил в'язкого тертя, представленого в (14) складовими $-k\omega L$, $-\frac{1}{2}kL\dot{\varphi}_\delta$.

При заданій функції $M_\delta^{mer}(\omega + \dot{\varphi}_\delta)$ й відомих початкових умовах для цього рівняння ставиться задача Коші. Як зазначено вище, вона розв'язується чисельно методом Рунге-Кутти.

В розділі 5 виконане моделювання крутильних автоколивань колони при різних значеннях її довжини L , нелінійної функції моменту сил тертя долота M_δ^{mer} та інших характерних параметрів. Дослідження показали, що хоча й модель (14) набагато простіша моделі (11), вона призводить до такого ж результату. Наприклад, для $L = 1000$ м при $\omega = 0,72$ рад/с відбувається біфуркація Хопфа, і в діапазоні $0,72 \leq \omega \leq 3,5$ рад/с стаціонарні обертання переходять в автоколивальні процеси (рис.10) з точками зламу, які розділяють швидкі та повільні рухи, і називаються релаксаційними. При подальшому переході через значення $\omega = 3,5$ рад/с автоколивання втрачаються і настає стаціонарне обертання. Зазначимо, що при неврахування в'язкості промивної рідини діапазон автоколивань розширюється до $0,71 \leq \omega \leq 3,77$ рад/с.

Розглянута також задача про згинальні коливання бурильної колони, яка обертається лежачи на дні горизонтальної свердловини. Сформульоване рівняння вільних коливань

$$EI \frac{d^4 \delta u}{dz^4} - F_z \frac{d^2 \delta u}{dz^2} + \frac{\sqrt{1 + \mu^2}}{a} f^{мяжс} \delta u + \gamma \frac{\partial^2 \delta u}{\partial t^2} = 0, \quad (15)$$

де δu - поперечне згинальне переміщення колони,
 EI - її згинальна жорсткість,
 μ - коефіцієнт тертя,
 $f^{тяж}$ - погонна сила тяжіння,
 a - міжтрубний зазор, F_z - осьова сила.

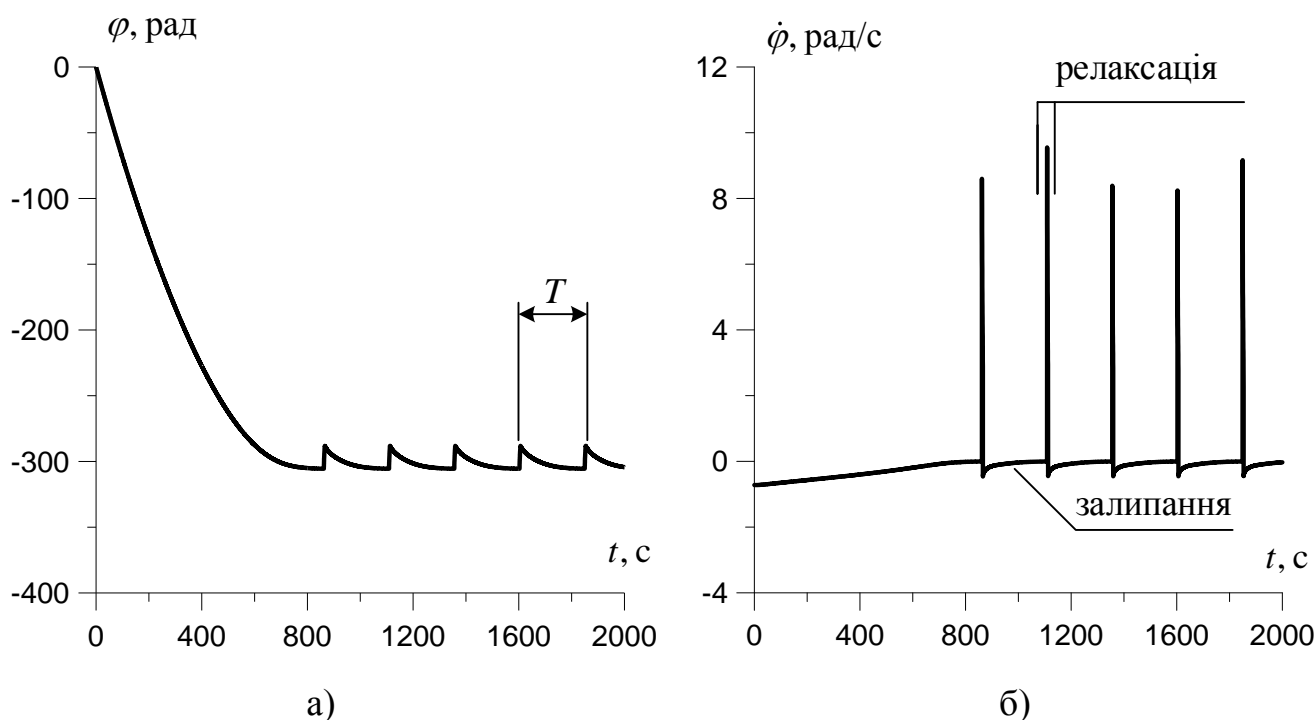


Рисунок 10 – Форма релаксаційних автоколивань долота ($L=8000$ м) (а), графік зміни кутової швидкості $\dot{\varphi}(t)$ долота ($L=8000$ м, $\omega = 0,72$ рад/с) (б)

Для рівняння (15) побудоване характеристичне рівняння. Підставивши $\delta u = \delta c \cdot \sin(\pi z/\lambda) \cdot \sin t$ в (15), одержимо характеристичне рівняння

$$EI \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 + F_z \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 + \frac{\sqrt{1 + \mu^2}}{a} f^{тяж} - \gamma k^2 = 0. \quad (16)$$

нього визначаємо частоту k вільних коливань БК для заданої півхвилі λ

$$k = \sqrt{\left[EI \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 + F_z \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 + \frac{\sqrt{1 + \mu^2}}{a} f^{тяж} \right] / \gamma}. \quad (17)$$

Як видно, вона зростає з прикладанням розтягуючої осьової сили $F_z(z)$ й зменшується при дії стискуючої $F_z(z)$. Значення k істотно залежить також від величини міжтрубного зазору a й з його зменшенням зростає.

На рис. 11 наведені графіки залежності частоти k від довжини півхвилі λ в діапазоні $10 \leq \lambda \leq 50$ м при $\gamma = 38,7$ кг/м. Криві 1, 2, 3 відповідають випадкам, коли труба БК вільна від в'язей і коли міжтрубний зазор a становить 0,04 і 0,02 м, відповідно. З наведених графіків випливає, що вплив контактної взаємодії БК, що обертається, із дном свердловини на значення частот k її власних коливань стає

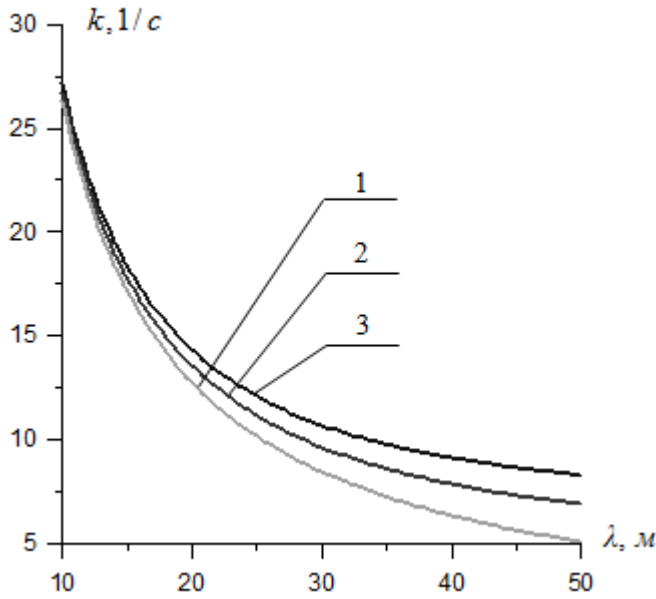


Рисунок 11 – Частотна діаграма поперечних коливань бурильної колони на дні свердловини

більш помітним зі збільшенням півкроку λ й зменшенням міжтрубного зазору a .

Другий вид згинальних коливальних рухів БК, що обертається на дні горизонтальної свердловини, пов'язаний з поширенням біжучих гармонічних хвиль

$$\delta u(z, t) = \delta c \sin(z(\pi/\lambda) - \varphi t), \quad (18)$$

де π/λ – хвильове число,

φ – циклічна частота.

Ці параметри визначають фазову швидкість поширення гармонічної хвилі $w = \varphi \lambda / \pi$.

Для одержання залежності між φ і λ необхідно в рівнянні (15) замість змінної $\delta u(z, t)$ підставити

праву частину рівності (18). У підсумку одержимо дисперсійне рівняння, яке за формою збігається з рівнянням (16) і має розв'язок у вигляді рівності (17). З його допомогою можна знайти функцію фазової швидкості.

$$w = \sqrt{\frac{EI(\pi/\lambda)^2 + F_z + \sqrt{(1 + \mu^2)/a}(\lambda/\pi)^2 f^{тяж}}{\gamma}}. \quad (19)$$

Оскільки вона залежить від довжини півхвилі λ , виявляється, що згинальні гармонічні хвилі з різними довжинами поширюються вздовж осі БК з різними швидкостями. Це означає, що згинальна хвиля довільної форми при переміщенні змінює свій профіль, тобто диспергує, а без дисперсії можуть поширюватися лише синусоїдальні (косинусоїдальні) хвилі. Причому швидкості цих хвиль зростають зі збільшенням розтягуючої сили F_z й зменшенням міжтрубного зазору a .

Для стану відносного спокою колони, що обертається, з (15) впливає також рівняння стійкості

$$EI \frac{d^4 \delta u}{dz^4} - F_z \frac{d^2 \delta u}{dz^2} + \frac{\sqrt{1 + \mu^2}}{a} f^{тяж} \delta u = 0. \quad (20)$$

Якщо довжина L колони велика, то форму її випучування можна задати у вигляді $\delta u_\lambda(z) = \delta c \cdot \sin(\pi z / \lambda)$, λ – довжина півхвилі втрати стійкості. Тоді критичне значення осьової сили дорівнює

$$F_z^{cr} = -2 \sqrt{EI f^{тяж} \frac{1 + \mu^2}{a}}, \quad (21)$$

а відповідна їй довжина хвилі λ складає

$$\lambda^{cr} = \pi \sqrt[4]{EI \frac{a}{\sqrt{1+\mu^2}} f^{тяж}}. \quad (22)$$

Як видно, F_z^{cr} зростає із збільшенням коефіцієнта тертя μ і зменшується із збільшенням міжтрубного зазору a .

Досить деструктивний вплив на динаміку згинання колони здійснюють коливання кружляння долота. В цих випадках долото перекочується навколо осі колони по дну свердловини з ковзанням (фрикційна модель) або без ковзання (неголономна модель). При їх реалізації спостерігаються випадки прямого та оберненого кружляння, коли напрям колового руху долота співпадає або протилежний напрямку обертання колони, а швидкість його колового руху набагато перевищує швидкість колони. Для дослідження цих процесів в літературі сформульовані складні нелінійні моделі, для яких чисельними методами знайдені траєкторії цих рухів у закритичних випадках. В дисертації для їх аналізу побудована лінійна модель, що годиться для дослідження малих коливань і відображає поведінку системи на початковій стадії їх розвитку. З її допомогою отримані наочні аналітичні розв'язки, які ілюструють ефекти зародження коливань кружляння та встановлюють їх форми в малому околі вихідного недеформованого стану і встановлюють тенденції їх розвитку. З їх застосуванням можна визначати параметри системи, які задають геометрію долота і поверхні дна свердловини, силу притискання долота до цієї поверхні та кутову швидкість обертання колони, при яких реалізується ефект кружляння долота. Встановлено, що у зв'язку з великими значеннями сил тертя ці коливання мають, переважно, кінематичну природу і тому вони можуть мати форму як прямого, так і зворотного кружляння, кутова швидкість яких може суттєво перевищувати швидкість обертання самої колони. Показано, що шляхом варіювання значень цих параметрів можна прогнозувати зародження коливань кружляння і уникати їх.

ВИСНОВОК

У дисертаційній роботі поставлені і розв'язані нові наукові задачі про теоретичне моделювання квазістатичних та динамічних фрикційних явищ, що супроводжують буріння вертикальних та похило-скерованих свердловин.

1. Показано, що основні ефекти, які перешкоджають бурінню глибоких вертикальних і похило-скерованих свердловин та сприяють виникненню нештатних і аварійних ситуацій, зумовлені дією квазістатичних та динамічних сил тертя. Розглянуті моделі сил тертя, які використовуються у науковій літературі.

2. Встановлено, що оскільки на практиці вісь свердловини зазвичай представляється у вигляді комбінації відрізків прямих або в дискретній (табличній) формі, то для проведення комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану колони і сил опору при виконанні технологічних операцій буріння спочатку методами чисельної інтерполяції повинен бути виконаний перехід від дискретної форми задання геометрії траєкторії свердловини до аналітичної, а потім застосована теорія гнучких криволінійних стержнів. Зроблено висновок про актуальність цієї проблеми.

3. Запропонована методика аналітичного представлення геометрії осьової лінії свердловини по її дискретним (табличним) проектним характеристикам або даним свердловинної навігації. Сформульована система диференціальних рівнянь осьового руху бурильної колони, змінні коефіцієнти та геометричні параметри якої обчислюються з використанням кубічних інтерполяційних сплайнів.

4. Виконано комп'ютерний аналіз фрикційних сил опору і напружено-деформованого стану пружних бурильних колон при різних значеннях дискретних відхилень траєкторії свердловини від ідеальної, різних значеннях коефіцієнта тертя та різних режимах виконання технологічних операцій. Показано, що розроблена методика може бути використана для прогнозування недопустимих значень геометричних, конструктивних та технологічних характеристик системи та запобігання нештатним ситуаціям.

5. Розв'язана задача про спряження ділянок траєкторій свердловини з різними значеннями їх кривизни. Показано, що спряження ділянок за рахунок установки перехідних сегментів у формі дуг кола, яке використовується на практиці, є нераціональним, оскільки призводить до формування у цих зонах значних напружень та сил тертя і опору. Запропоновано застосовувати в якості з'єднувальних вставок (як це робиться при трасуванні колій на залізничних та автомобільних дорогах) дуги клотоїди або кубічної параболи. Це дозволяє суттєво (на 15 – 20%) зменшити рівень фрикційних сил опору і тим самим зменшити напругу в колоні та ймовірність її руйнування, зменшити її зношування та енерговитрати на виконання операцій буріння, покращити провідність крутного моменту та осьової сили від приводного пристрою до долота, запобігти виникненню ефекту прихвату колони. Ця пропозиція запатентована.

6. Вперше поставлена задача про пружні торсіонні автоколивання бурильної колони у в'язкому середовищі промивної рідини глибокої вертикальної свердловини, які збурюються в результаті нелінійної фрикційної взаємодії долота з поверхнею її дна. Запропонована нова математична модель з розподіленими параметрами і системи з однією степінню вільності торсіонних автоколивань бурильної колони. Із застосуванням значень параметрів в'язкості промивних рідин, які використовуються у практиці буріння, сформульовані диференціальні рівняння. Показано, що форми автоколивань є релаксаційними. Встановлено, що урахування сил в'язкого тертя призводить до незначного уточнення (3 – 5%) критичних швидкостей самозбурення автоколивань.

7. Побудовані лінеаризовані моделі малих коливань кружляння долота по поверхні дна свердловини, викликаних фрикційною взаємодією долота, що обертається, з поверхнею породи на дні свердловини. Показано, що з їх допомогою можна моделювати нештатні ефекти як зворотного, так і прямого кружляння, а також суттєвого перевищення кутовою швидкістю кружляння кутової швидкості власного обертання колони на початковому етапі зародження коливань.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Монографія

1. Моделирование нештатных ситуаций при бурении глубоких скважин : монография / [В. И. Гуляев, С.Н. Глазунов, О.В. Глушакова и др.]. – Киев : Изд-во «Юстон», 2017 . – 544 с.

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

2. Glazunov S.N. Computer simulation of resistance force mitigation through curvature bridging in extended bore-holes / V.I. Gulyayev, E.N. Andrusenko, S.N. Glazunov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2017. –V. 156. – P. 594-604. (USA)

3. Glazunov S. Frequency analysis of drill bit whirlings on uneven bottoms of deep bore-holes / V. Gulyayev, S. Glazunov, O. Vashchilina // Journal of Mathematics and System Science. – 2017. – V. 7. – P. 14 – 24. (USA)

4. Glazunov S.N. Stationary and non-stationary self-induced vibrations in waveguiding systems / V.I. Gulyayev, O.V. Glushakova, S.N. Glazunov // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2014. – V. 4(3) . – P. 213-224. (USA)

5. Глазунов С. Н. Торсионные колебания глубоких бурильных колонн в вязкой жидкости / В. И. Гуляев, П. З. Луговой, О. В. Глушакова, С. Н. Глазунов // Прикладная механика. – 2016. – Т. 52(2). – С. 64-77. Перекладено видавництвом “Springer” англійською мовою. [Glazunov S.N. The torsional vibrations of a deep drill string in a viscous liquid medium / V.I. Gulyayev, P.Z. Lugovoi, O.V. Glushakova, S.N. Glazunov // International Applied Mechanics. – 2016. –V. 52(2) . – P. 64-77].

6. Глазунов С. Н. Устойчивость и колебания вращающейся бурильной колонны в канале горизонтальной скважины / В. И. Гуляев, С. Н. Глазунов // Проблемы прочности. – 2017, №6. – С.124 – 132. Перекладено видавництвом «Springer» англійською мовою [Glazunov S.N. Stability and vibrations of a rotation drill string in the horizontal borehole/ V. I. Gulyayev, S. N. Glazunov // Strength of Materials. – 2017. – №6 (420). – P. 45 – 54].

7. Глазунов С. Н. Торсионні автоколивання бурильних колон в рідкому середовищі / В.В. Гайдайчук, О. В. Глушакова, С. Н. Глазунов // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2013. – № 91. – с. 39 – 48.

8. Глазунов С. М. Стійкість і коливання бурильних колон з внутрішніми потоками рідини в каналах горизонтальних свердловин / О.М. Андрусенко, С. М. Глазунов // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015. – № 95. – с. 43-54.

Статті у фахових виданнях

9. Глазунов С. М. Консервативні і дисипативні моделі торсійних автоколивань колон глибокого буріння / С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету. – 2013. –№23. – с. 88-94.

10. Глазунов С.М. Торсионні коливання бурильних колон у в'язкому рідкому середовищі / С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету. – 2015. – №1(31) . – с. 96 –101.

11. Глазунов С.М. Задачі моделювання нештатних ситуацій процесів глибокого буріння / С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету. – 2017. – № 1(37). – с. 56 – 62.

12. Glazunov S.N. Frequency analysis of periodic regimes of drill bit rollings on uneven bottom of a deep bore-hole / S.N. Glazunov, O.V. Vashchilina, I.V. Lebedeva // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyev. Series: Physics & Mathematics. – 2016. – №1. – P. 41 – 44.

13. Глазунов С. Н. Быстрые и медленные движения в режимах торсионных автоколебаний колонн глубокого бурения / В. И. Гуляев, О. В. Глушакова, С.Н. Глазунов, Н.В. Муса // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – 2013. – №12. – с. 5 – 18.

14. Глазунов С. М. Моделювання торсіонних автоколиваний колон глибокого буріння з урахуванням ефектів дисипації енергії у гідродинамічному середовищі / О. В. Глушакова, С. М. Глазунов //Машинознавство. – 2013. – № 7-8 (193-194) . – с. 73-78.

15. Глазунов С.М. Математична модель крутильних автоколиваний бурильної колони в рідкому середовищі / В.І. Гуляєв, О.В. Глушакова, С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету.– 2012.– №26.– с. 413 – 419.

16. Глазунов С.М. Самозбудження крутильних коливаний бурильної колони в циліндричному каналі похилої свердловини / О.В. Глушакова, С.М. Глазунов // Вісник Національного транспортного університету.– 2016.– №1(34).– с. 89 – 96.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

17. Glazunov S.N. Simulation of Buckling and Dead Lock States of Drill Strings in Curvilinear Bore-holes / V.I. Gulyayev, S.N. Glazunov, O.M. Andrusenko, N.V. Shlyun // 2017 Proceedings of International Conference On Advances In Civil, Structural and Mechanical Engineering. Institute of Research Engineers and Doctors, USA. Zurich, 02 – 03 September, 2017 (**Switzerland**).

18. Glazunov S.N. Modeling the Selfexcitation (Hopf's Bifurcations) of Torsional Vibrations of Drill Strings in Deep Bore-Holes / O. Glushakova, S. Glazunov // International Conference for Advanced Drilling Technology. Celle, Germany, 14 – 15 September 2015 (**Germany**).

19. Glazunov S. Critical states of self-exciting non-linear vibrations of deep drill strings / V. Gulyayev, O. Glushakova, L. Shevchuk, S. Glazunov // 8th European Nonlinear Dynamics Conference, Vienna, Austria, July 6 – 11, 2014 (**Austria**).

20. Glazunov S. Bifurcation Phenomena in Relaxation Auto-oscillation of Waveguiding Systems / V. Gulyayev, O. Glushakova, S. Glazunov // Proceedings of Fourth International Conference “Nonlinear Dynamics”, Sevastopol, Ukraine, June, 19-22, 2013. – P. 57 – 62. (**Ukraine**).

21. Glazunov S. Insipient Regimes of Drill Bit Whirlings on Uneven Bottom of Deep Bore-Holes / V. Gulyayev, O. Vashchilina, S. Glazunov // Proceedings of 5th International Conference “Nonlinear Dynamics” – 2016. Kharkiv, Ukraine, 27-30 September 2016. – P. 312 – 317. (**Ukraine**).

22. Глазунов С.М. Моделювання торсіонних автоколиваний колон глибокого буріння з урахуванням ефектів дисипації енергії у гідродинамічному середовищі /

О.В. Глушакова, С.М. Глазунов // 11-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, – Львів, 12 – 15 травня, 2013. – С.63-64.

23. Глазунов С.М. Крайові ефекти в формах торсіонних автоколиваний бурильних колон в похилих свердловинах / В. І. Гуляєв, О. В. Глушакова, С. М. Глазунов // Актуальные проблемы инженерной механики / Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции. – Одесса – 2016. – С. 55 –58.

24. Глазунов С.М. Постановка задачі про автоколювання бурильної колони в рідкому середовищі у порожнині вертикальної свердловини / В. І. Гуляєв, О.В. Глушакова, С.М. Глазунов //LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2013. – С. 448.

25. Глазунов С.М. Аналіз торсіонних автоколиваний бурильних колон на базі консервативної та дисипативної математичних моделей / С.М. Глазунов // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2014. – С. 420.

26. Глазунов С.М. Аналітичні лінеаризовані моделі зародження режимів колювань кружляння бурового долота /О.В. Ваціліна, С.М. Глазунов // LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2016. – С. 388.

27. Глазунов С.М. Механічні ефекти, що супроводжують процеси буріння криволінійних свердловин / С.М. Глазунов // LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2017. – С. 454.

Патент

28. Пат.116210 – Україна, МПК Е 21В 7/06, Е 21В 19/00 Спосіб спряження криволінійних секцій траєкторій похило-скерованих свердловин, що мінімізує сили опору руху колони / [В. І. Гуляєв, С.М. Глазунов, О.М. Андрусенко] Заявник та власник Національний транспортний університет. – № и 2016 12143 30.11.2016: опубл. 10.05.2017. Бюл. № 9.

АНОТАЦІЇ

Глазунов С.М. Квazістатичні та динамічні фрикційні ефекти при бурінні глибоких свердловин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ, 2018.

У дисертації поставлена нова задача про теоретичне моделювання та виявлення найбільш загальних закономірностей впливу лінійних та нелінійних сил контактного та в'язкого тертя на рухомість бурильної колони при проведенні

технологічних операцій буріння і особливості перебігу вимушених та самозбурених коливань.

Завдяки спільному застосуванню методів будівельної механіки аналізу пружного деформування гнучких криволінійних стержнів, методів теоретичної механіки, методів диференціальної геометрії та обчислювальних методів, побудовані нові математичні моделі та диференціальні рівняння, які описують операції протягування з обертанням бурильних колон у криволінійних свердловинах з неупорядкованою хвилястістю, тривимірна геометрія траєкторій яких задана в дискретній (табличній) формі за результатами геофізичних вимірів (свердловинної навігації). Вони дозволяють обчислити сили контактного та фрикційного опору та прогнозувати стани їх прихватів. З його використанням розроблена нова методика проектного з'єднання ділянок траєкторії свердловини з різними функціями кривизни. Запропоновано застосовувати для цієї мети сегменти дуг спіралей Корню або кубічних парабол. Комп'ютерним моделюванням встановлено, що таке трасування траєкторії свердловини дозволяє суттєво знизити сили фрикційного опору.

На основі аналізу відомих у літературі функцій сил нелінійної фрикційної взаємодії долота з породою (сил різання) запропоновані нові математичні моделі торсіонних автоколивань бурильних колон у в'язкому середовищі промивної рідини. Виконане комп'ютерне моделювання біфуркаційних переходів від станів простого обертання колони до станів їхніх торсіонних автоколивань.

Ключові слова: криволінійні свердловини, кінематичне тертя, сили опору, в'язке тертя, самозбурення коливань, нештатні ситуації.

Глазунов С.Н. Квазистатические и динамические фрикционные эффекты при бурении глубоких скважин. - Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет, Киев, 2018.

В диссертации поставлена задача о теоретическом моделировании и выявлении наиболее общих закономерностей влияния линейных и нелинейных сил контактного и вязкого трения на подвижность бурильной колонны при проведении технологических операций бурения и особенности протекания вынужденных и самовозмущенных колебаний.

Путем применения методов строительной механики исследования упругого деформирования гибких криволинейных стержней, методов теоретической механики, методов векторного анализа и вычислительных методов построены новые математические модели и дифференциальные уравнения, описывающие операции протягивания с вращением бурильных колонн в криволинейных скважинах с неупорядоченной извилистостью, трехмерная геометрия траекторий которых задана в дискретной (табличной) форме по проектным данным либо результатам геофизических измерений (скважинной навигации). На основе методов сплайн интерполяции выполнен переход от дискретного представления геометрии скважины к аналитической. Подсчитаны параметры подвижных базисов, кривизны и

кручения. Сформулированы дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами. Они позволяют вычислять силы контактного и фрикционного сопротивления движению колонны и прогнозировать состояния её прихватов. С использованием предложенного подхода разработана новая методика проектного соединения участков траектории буровой скважины с разными функциями кривизны. Предложено применять для этой цели сегменты дуг спиралей Корню или кубических парабол. Компьютерным моделированием установлено, что такая трассировка траектории скважины позволяет существенно снизить силы фрикционного сопротивления.

На основе анализа известных в литературе функций сил нелинейного фрикционного взаимодействия долота с породой (сил резания) предложены новые математические модели торсионных автоколебаний буровых колонн в вязкой среде промывочной жидкости. Выполнено компьютерное моделирование бифуркационных переходов от состояний простого вращения колонны к состояниям их торсионных автоколебаний. Выведены новые уравнения малых колебаний кружения буровой колонны и долота. С их помощью проведено аналитическое моделирование нештатных эффектов как прямого, так и обратного кружения, а также существенного превышения угловой скоростью кружения угловой скорости вращения колонны.

Ключевые слова: криволинейные буровые скважины, кинематическое трение, силы сопротивления, вязкое трение, самовозмущение колебаний, нештатные ситуации.

Glazunov S. M. Quasi-static and dynamic frictional effects in deep bore-hole drilling. – Manuscript.

The thesis for the candidate of technical science degree on specialty 05.23.17 – Mechanics of Structures. – National Transport University, Kyiv, 2018.

Owing to the joint application of civil engineering methods for flexible curvilinear elastic rods deforming together with methods of theoretical mechanics, differential geometry and calculation mathematics, new mathematic models and differential equations are constructed. They describe drill string dragging with rotation inside curvilinear bore-holes with three-dimensional axes prescribed in a discrete (tabular) form with the use of results of geophysical survey (bore-hole navigation). They permit one to calculate the forces of contact and friction resistance to the drill string displacement and prognosticate the dead lock states. With their use, the new techniques for design connection of the trajectory segments with differing curvatures are elaborated. It is proposed for this aim to apply the Cornu spiral arcs or cubic parabols. On the basis of the functions of nonlinear frictional interaction of the drill bit with the destroyed rock (cutting forces) available in the modern literature, new mathematic models of drill string torsional autovibrations in viscous mud medium are elaborated. Computer simulation of bifurcation transfers from states of simple rotation of the drill string to the states of its autovibrations are studied.

Key words: curvilinear bore-holes, kinematic friction, resistance forces, viscous friction, self-excitation of vibrations, emergency situations.