

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

ШЛЮНЬ НАТАЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 539.3

**СТІЙКІСТЬ БУРИЛЬНИХ КОЛОН
В КРИВОЛІНІЙНИХ СВЕРДЛОВИНАХ**

05.23.17 – будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

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
Ориняк Ігор Володимирович
Інститут проблем міцності
ім. Г.С. Писаренка НАН України,
завідувач відділу фізичних основ
міцності і руйнування.

кандидат технічних наук
Крицький Володимир Борисович
Державне підприємство
«Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки»,
старший науковий співробітник
відділу довготермінової експлуатації АЕС.

Захист відбудеться „_____” _____ 2017 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 „_____” _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Проблеми енергетики, що стають найбільш гострими в ХХІ столітті, викликані наближенням вичерпності нафтових і газових ресурсів та ускладненням умов їх видобутку.

Вже не рідкі випадки проходки вертикальних свердловин глибиною понад 10 км, а рекордне віддалення від бурильної установки горизонтальної свердловини перебільшило 13,5 км. Буріння таких свердловин проходить на межі сучасних технологічних можливостей при граничних значеннях швидкостей, гідростатичних тисків і температур, а також параметрів міцності та зносу матеріалів бурильних колон під суттєвим впливом ефектів інтенсивних коливань і нестійкості всієї системи. Цілком природно, що ці процеси найчастіше супроводжуються позаштатними та аварійними ситуаціями, до числа яких можна віднести біфуркаційне випинання колон у свердловинах з криволінійними траєкторіями, що супроводжуються погіршенням провідності приводного моменту різання й осрової сили на долото, підвищенням зносу труби колони, збільшенням енергоспоживання системою, збільшення інтенсивності полів напруг та деформацій в колонах і підвищенням імовірності їх руйнування.

Знаходження методами будівельної механіки параметрів процесу глибокого буріння, за яких реалізуються критичні стани, також ускладнене структурою розв'язувальних диференціальних рівнянь, які їх описують, оскільки вони відносяться до класу сингулярно збурених та мають змінні коефіцієнти.

Враховуючи, що освоєння підземних енергетичних ресурсів, інтенсифікація їх видобутку з великих глибин і забезпечення високого рівня їх добування за допомогою геотехнологій криволінійного буріння найближчим часом будуть постійно зростати та займуть домінантне положення серед інших технологій, можна відзначити, що проблема комп'ютерного моделювання процесів випинання бурильних колон в каналах глибоких криволінійних свердловин є **актуальною**

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 постановці та розв'язанні задач про біфуркаційне пружне випинання бурильних колон в каналах надглибоких криволінійних свердловин з урахуванням факторів їх неоднорідного переднапруження зосередженими крайовими силами, а також розподіленими силами тяжіння, контактної та фрикційної взаємодії зі стінкою свердловини.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступне:

- поставити задачу на власні значення про теоретичне моделювання критичних станів бурильних колон в порожнинах каналів надглибоких криволінійних свердловин;
- сформулювати нелінійні рівняння пружного деформування бурильних колон в порожнині каналу криволінійної свердловини, на їх основі побудувати однорідні лінеаризовані рівняння їх випинання;
- для визначення змінних коефіцієнтів біфуркаційних рівнянь створити методику обчислення поздовжніх сил в бурильній колоні при її осьовому русі в порожнині каналу криволінійної свердловини;
- розвинути методику чисельного розв'язку поставленої задачі на власні значення;
- виконати чисельні дослідження ефектів пружного біфуркаційного випинання бурильних колон в порожнинах каналів криволінійних свердловин різної геометрії.

Об'єктом дослідження є явище пружного випинання бурильних колон в каналах криволінійних свердловин при виконанні технологічних операцій буріння.

Предмет дослідження є критичні значення зовнішніх осьових крайових сил і відповідних їм розподілених фрикційних сил, які впливають на стійкість колони.

Методи дослідження. Задача про випинання бурильних колон сформульована за допомогою методів будівельної механіки стійкості пружних систем, бурильна колона ототожнювалась з наддовгим трубчастим пружним стрижнем, моделювання якого здійснювалося за допомогою теорії гнучких криволінійних стрижнів. Для побудови рівнянь контактної взаємодії бурильної колони зі стінкою свердловини застосовувались методи диференціальної геометрії та теорії каналових поверхонь. Побудовані диференціальні рівняння зі змінними коефіцієнтами задачі на власні значення розв'язувались методом скінченних різниць з вельми маленькими кроками дискретизації.

Достовірність результатів досліджень підтверджувалася обґрунтованим вибором прийнятих механічних моделей (теорія гнучких криволінійних стрижнів і основні положення диференціальної геометрії та теорії поверхонь), практичною перевіркою результатів обчислень, відповідністю встановлених закономірностей загальним властивостям стрижневих систем, зіставленням отриманих результатів з результатами розв'язків інших авторів, які знайдені при граничних значеннях визначальних параметрів, а також якісною узгодженістю результатів розрахунків з висновками, отриманими на підставі міркувань фізичного характеру.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Поставлена нова задача про пружну стійкість бурильних колон в глибоких криволінійних свердловинах з урахуванням дії краєвих силових збурень і розподілених сил тяжіння, а також сил контактної та фрикційної взаємодії колони зі стінкою свердловини. За допомогою основних положень будівельної механіки стійкості пружних систем, методів диференціальної геометрії та теорії поверхонь побудована система біфуркаційних однорідних звичайних диференціальних рівнянь. Показано, що вони відносяться до класу сингулярно збурених; розроблено методику

розв'язування цих рівнянь, визначення їх відповідних власних значень та власних форм.

2. Вперше розв'язана задача про втрату стійкості та випинання наддовгих бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. Розглянуті свердловини з прямолінійними, коловими та більш складнішими обрисами їх осьових ліній.

3. Вперше показано, що в залежності від геометрії осьової лінії втрата стійкості бурильної колони може супроводжуватися її біфуркаційним випинанням у формі короткохвильових вейвлетів в крайових зонах або локалізуватися на деяких заздалегідь не відомих ділянках траєкторії свердловин.

Практичне значення отриманих результатів. 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 режими буріння залежно від характерних параметрів.

Отримані в дисертації результати наукових досліджень використовуються ТОВ "ГЕНПРОФБУД" при проектуванні та розрахунках відповідальних конструкцій зі стержневими трубчастими елементами, що піддаються впливу інтенсивних поздовжніх сил, сил тертя і крутних моментів. Вони будуть застосовуватись ТОВ "ГЕНПРОФБУД" також для розробки проектів глибокого буріння.

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

Зважаючи на те, що криволінійні стержні знаходять також все більш широке застосування в автомобілебудуванні, 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.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень були отримані автором самостійно. Дисертанту належать аналітичні викладки, числова реалізація на ПК задач механіки та аналіз отриманих результатів. У роботах [13, 15, 18, 24, 25, 56, 60, 70, 72, 73, 111, 112] В.І. Гуляєв брав участь у постановці задач та обговоренні отриманих результатів. У роботах [1, 13, 15, 24, 25, 56, 60, 70, 111] співавтором О.М. Андрусенко надана допомога у розробці та налаштуванні обчислювального комплексу для проведення комп'ютерного моделювання досліджених процесів. У роботах [7, 15, 56, 60, 111] співавтор В.В. Гайдайчук брав участь в обговоренні одержаних результатів.

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

- SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition – (Russia, Moscow, October, 10 – 12, 2013).
- Celle Drilling, (Germany 14-15 September at Congress Union Celle, 2015).

- Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів (Україна, Рівне, 19-22 лютого 2015 р);
- Актуальные проблемы инженерной механики, III Международная научно-практическая конференция (Одесса: «Внешрекламсервис», травень 2016).

Результати дисертаційної роботи доповідались також на:

- LXXIII науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Україна, Київ, 15 – 17 травня 2017 р.).
- LXXI науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Україна, Київ, 12 – 15 травня 2015 р.).
- LXXII науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Україна, Київ, 14 – 16 травня 2016 р.).

Тези доповідей опубліковані у матеріалах зазначених конференцій.

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 26 публікаціях [1, 7, 13, 15, 18, 24, 25, 42, 44 – 46, 56, 60, 70, 71, 72, 73, 111, 112]: з них 1 монографія, 7 статей в закордонних журналах, 8 робіт опубліковано у фахових виданнях, 4 — в тезах міжнародних конференцій, 4 — в збірниках тез наукових конференцій Національного транспортного університету та 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 2 додатків та списку використаних джерел, який містить 138 найменувань. Вона містить 146 сторінок друкованого тексту, 13 таблиць, 38 рисунків. Повний обсяг дисертації складає 203 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. В ньому обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз технічних і математичних аспектів проблем випинання бурильних колон в порожнинах криволінійних свердловин (рис.1). Дано огляд представлених у науковій літературі результатів досліджень. Показано, що в процесі виконання технологічних операцій буріння криволінійних свердловин бурильна колона піддається дії розподілених гравітаційних, контактних і фрикційних сил складної структури, викликаних контактною взаємодією колони зі стінкою свердловини. Сили опору, які породжені такою взаємодією можуть призводити до істотного збільшення осьових сил в колоні та бути причиною її втрати стійкості, що супроводжується виникненням позаштатних ситуацій.

Продемонстровано, що розглянута проблема пов'язана із загальною, далекою від завершення, задачею пружного випинання і стійкості гнучкого стрижня в порожнині криволінійного каналу.

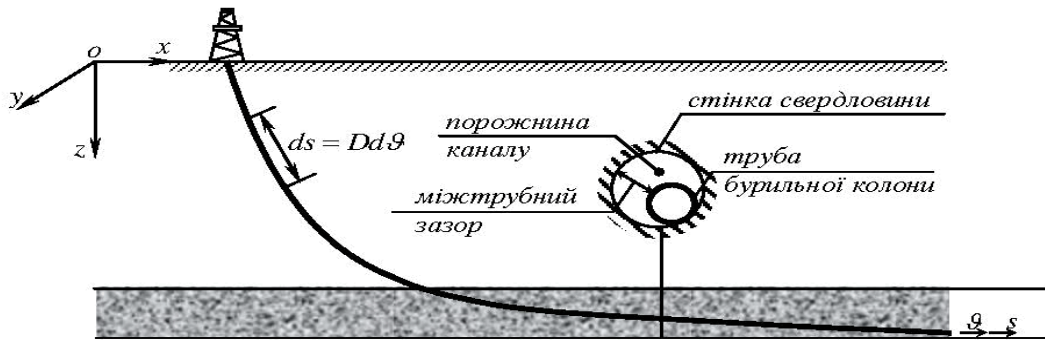


Рисунок 1 – Пружне згинання бурильної колони в порожнині похилої свердловини

Встановлено, що складність розглянутих процесів нелінійного згинання бурильної колони обумовлена її великою довжиною, складністю геометрії її осової лінії та дією задалегідь невідомих контактних сил, у зв'язку з чим, сформульовані нелінійні крайові задачі стають сингулярно збуреними, а диференціальні рівняння, що їх описують, мають швидко змінні коефіцієнти і набувають так званої «обчислюваної жорсткості», яка суттєво ускладнює методику їх розв'язання. Наведено аналіз праць дослідників, які внесли істотний вклад у розвиток проблем аналізу стійкості бурильних колон у криволінійних свердловинах і суміжних з ними напрямків. Серед них Н.Ф. Алфутів, І.Л. Барський, В.Л. Бідерман, В.М. Гордєєв, В.Г. Григулецький, Н.Б. Кадиров, М.А. Мислюк, Б.А. Нікітін, І.В. Ориняк, А.В. Перельмутер, І.Й.Рибич, К.М. Солодкий, Б.З. Султанов, Г.М. Улітін, В.І. Федосьєв, Г. Циглер, А. Abdulraheem, A. Al-Majed, M.R. Awall, N. Challamel, K.W. Chang, Y. Chen, R. Dawson, D.L. Gao, G.H. Gao, X. He, F.A. Howes, N.C. Huang, W.J. Huang, K. Khan, A. Kyllingstad, Young W. Kwon, C.W. Lim, F.W. Lui, A. Martinez, R.C. McCann, M.A. Mohiuddin, S. Miska, P.R. Paslay, P.D. Pattillo, J.B. Salies, S.P. Timoshenko, G. K. Tron, X. Wang, James S.Walker, G.W. Wei, Z. Yuan та інші займалися загальними проблемами механіки випинання стержнів і бурильних колон. Питання згинання криволінійних стрижнів при різних умовах навантаження та суміжні питання нелінійного деформування бурильних колон у криволінійних свердловинах вивчали В.Ф. Бутузов, А.Б. Васильєва, Г. Вудс, В. І. Гуляєв, В. П. Зіненко, Е.П. Попов, В.И. Рязанов, В.А. Світлицький, К. Чанг, Elie R. Barakat, JB Jr. Cheatham, O. Civalek, J.C. Cunha, L.Gan, S. Lukasiewicz, R.F. Mitchell, D. E. Newland, P.V.R. Surayanarayana, M. Tan, M.A. O'Donnell, K.G. Sorenson, JJB. Cheatham, C. Sun, Y. Xiang, Y.B. Zhao та інші вчені.

Відмічено, що негативні ефекти, які сприяють випинанню та втраті стійкості бурильних колон у глибоких криволінійних свердловинах залишаються практично не дослідженими, тому тема дисертаційної роботи, направлена на моделювання критичних станів і явищ випинання бурильних колон у криволінійних каналах глибоких свердловин при різних значеннях геометричних параметрів та врахуванні фактору тертя є **актуальною**.

У **розділі 2** представлена нова математична модель втрати стійкості бурильної колони (БК) в каналі похилої свердловини з прямолінійною віссю. Вона базується на застосуванні теорії гнучких стрижнів та припущенні про те, що під дією сил тяжіння при біфуркаційному випинанні колона продовжує залишатися в контакті з її поверхнею.

Прийнято, що напружений стан кожного елемента колони визначається головними векторами внутрішніх сил $\mathbf{F}(s)$, моментів $\mathbf{M}(s)$ і розподіленими векторами зовнішніх сил $\mathbf{f}(s)$. Сили $\mathbf{f}$ містять сили тяжіння $\mathbf{f}^{тяж}(s)$, а також сили контактної взаємодії $\mathbf{f}^{конт}(s)$ й сили тертя $\mathbf{f}^{тер}(s)$ між зовнішньою поверхнею труби БК та стінкою свердловини. У зв'язку з цим векторні рівняння рівноваги записуються

$$\frac{d\mathbf{F}}{ds} = -\mathbf{f}^{тяж} - \mathbf{f}^{конт} - \mathbf{f}^{тер}, \quad \frac{d\mathbf{M}}{ds} = -\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{F}, \quad (1)$$

і є інваріантні по відношенню до будь-якої системи відліку.

Зазвичай при аналізі вигину криволінійних стрижнів ці рівняння формулюються в системі відліку, що визначається вектором Дарбу в якому $\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$ - орти нормалі, бінормалі та дотичної

$$\boldsymbol{\Omega} = k_R \mathbf{b} + k_T \mathbf{t}, \quad (2)$$

де $k_R = 1/R$ – кривина кривої, k_T – її кручення. Ці параметри обчислюються за формулами.

$$k_R = \mathbf{n} \frac{d^2 \mathbf{p}}{ds^2}, \quad k_T = \mathbf{t} \left(\mathbf{n} \times \frac{d\mathbf{n}}{ds} \right). \quad (3)$$

Однак більш зручним виявляється представити параметри k_R і k_T в системі координат $oxuz$ з ортами $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$, де орт $\mathbf{k}$ напрямлений по дотичній до осьової лінії БК, $\mathbf{i}$ - по нормалі до каналової поверхні Σ , а вектор $\mathbf{j}$ доповнює систему до правої трійки. Її використання дозволяє перетворити труднощі задачі, які пов'язані з існуванням обмежуючої каналової поверхні Σ , в перевагу, обумовлену тим, що геометрія осьової лінії L колони може бути представлена через параметри поверхні Σ . З огляду на це, замість вектора Дарбу $\boldsymbol{\Omega}$ (2) введемо вектор

$$\boldsymbol{\omega} = k_x \mathbf{i} + k_y \mathbf{j} + k_z \mathbf{k}, \quad (4)$$

що умовно представляє кутову швидкість системи $oxuz$ при її русі з одиничною швидкістю вздовж кривої L . Проекції вектора $\boldsymbol{\omega}$ на осі x , y , являють собою кривини проєкцій елемента ds на площини uoz і xoz відповідно; k_z – параметр, що характеризує кручення. Вони виражаються через відомі кривини циліндричної поверхні Σ , параметризованої за допомогою параметра u , спрямованого уздовж твірної, і параметра v , що визначає положення точки на напрямному колі радіуса a (рис. 2).

Тоді кривина k_x представляє геодезичну кривину k^{geod} кривої L на поверхні Σ . Вона може бути виражена таким чином

$$k_x = k^{geod} = \frac{\pm \sqrt{EG - F^2}}{(Eu'^2 + 2u'v' + Gv'^2)^{3/2}} (u''v' - v''u' + Au' - Bu'), \quad (5)$$

де A, B, E, F, G – геометричні величини, які визначаються через символи Крістофеля, а символ штрих позначає диференціювання по s .

Оскільки площина xoz ортогональна поверхні Σ , кривина k_y кривої L дорівнює нормальній кривині $k^{норм}$ цієї поверхні в напрямку орта $\mathbf{k}$. Тому,

відповідно до теореми Ейлера, вона визначається через головні кривини k_1 , k_2 поверхні Σ

$$k_y = k^{норм} = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta, \quad (6)$$

де $k_1 = 0$, $k_2 = 1/a$, θ – кут між ортом $\mathbf{t}$ і координатною лінією u .

Скрут k_z кривої L визначається формулою

$$k_z = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \psi / \Delta s, \quad (7)$$

де ψ – кут повороту осі ox відносно осі oz при переході системи $oxuz$ з точки s в точку $s + \Delta s$.

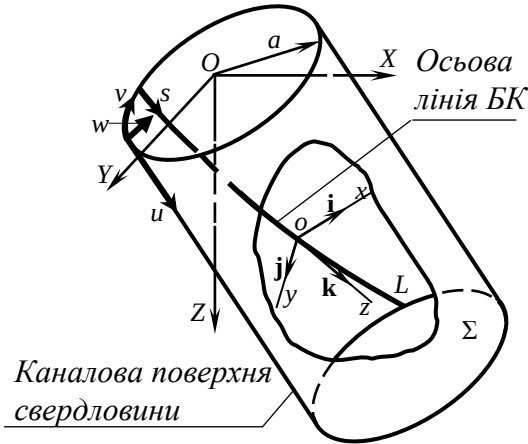


Рисунок 2 – Осьова лінія L бурової колони при її випинанні в циліндричному каналі свердловини

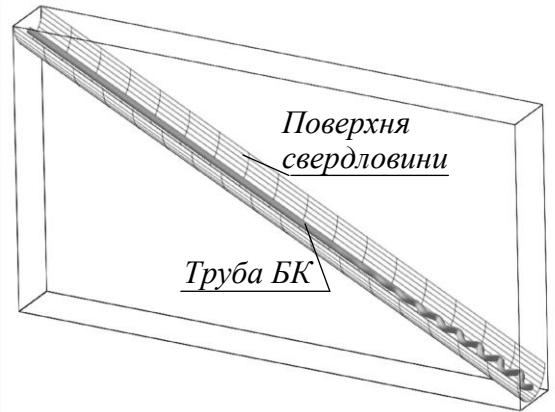


Рисунок 3 – Крайовий ефект в біфуркаційній формі бурової колони в похилій свердловині

Застосування триєдра ($\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$) дозволило розділити шукані змінні і звести співвідношення (1) – (7) до системи шести диференціальних рівнянь першого порядку відносно шести шуканих функцій, переміщень u , v , v' , геодезичної кривини k_x та внутрішніх сил F_y , F_z

$$\begin{aligned} dF_y / ds &= k_z (2EIv'v'' + EIk_x k_z - M_z k_x) + F_z k_x - f^{тяж} a v', \\ dF_z / ds &= -k_x [EI(k_x)' + M_z k_y - EIa(v')^2 k_z] + a(v')^2 (-2EIv'v'' - EIk_x k_z + M_z k_x) - f_z^{тяж}, \\ dk_x / ds &= 1 / EIa(v')^2 M_z + a(v')^2 k_z + 1 / EIF_y, \\ dv / ds &= (v'), \\ d(v') / ds &= 1 / ak_x \sqrt{1 - a^2(v')^2}, \\ du / ds &= \sqrt{1 - a^2(v')^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Лінеаризуючи ці рівняння в околі нейтрального стану та вводячи позначення $\delta v = \delta u$ для малих біфуркаційних переміщень, а також вважаючи, що $\delta u = 0$, отримаємо одне диференціальне рівняння четвертого порядку на власні значення відносно осьової стискаючої сили R , що прикладена на кінці колони

$$\begin{aligned} \delta y^{IV} + \left[-\frac{f^{тяж} (\cos \beta - \mu \sin \beta)}{EI} (S - s) + \frac{R}{EI} \right] \delta y'' + \\ + \frac{f^{тяж} (\cos \beta - \mu \sin \beta)}{EI} \delta y' + \frac{f^{тяж} \sin \beta}{aEI} \delta y = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

де β – кут нахилу свердловини; μ – коефіцієнт кулонівського тертя між колоною та стінкою свердловини.

Підкреслимо, що в окремому випадку, коли $\beta=0$ та відсутнє тертя, дане рівняння зводиться до відомого в науковій літературі рівняння втрати стійкості колони в горизонтальній прямолінійній свердловині

$$EI\delta y^{IV} + R\delta y'' + (f^{тяж} / a)\delta y = 0 \quad (10)$$

Цей факт може слугувати додатковим підтвердженням достовірності побудованої моделі.

За допомогою рівняння (9) було виконане дослідження стійкості колони в каналах прямолінійних свердловин при різних значеннях кута β , коефіцієнта тертя μ та довжин S свердловин. Для кожного значення осьової стискаючої сили R задача розв'язується методом скінченних різниць. Спочатку визначається функція внутрішньої осьової сили F_z і потім перевіряється виродженість рівняння (9). Дослідження показали, що оскільки при вибраних значеннях характерних параметрів довжина колони S достатньо велика та її згинальна жорсткість EI відносно мала (колона геометрично подібна до людської волосини) вплив першого доданку в рівнянні (9) порівняно малий і тому це рівняння можна віднести до класу сингулярно збурених. У зв'язку з цим, чисельними дослідженнями встановлено, що розв'язки мають вигляд крайових ефектів (рис.3) при кутах нахилу β більших за кут тертя ($\beta > \arccotg \mu$) та вони виявляються погано збіжними.

При $\beta < \arccotg \mu$ зони найбільших внутрішніх стискаючих осьових сил зміщуються вгору і форми втрати стійкості перебудовуються, набуваючи вигляду високочастотних гармонічних функцій зі змінною амплітудою, що розподілені по всій довжині колони.

У **третьому розділі** розглянута проблема деформування пружної бурильної колони радіусу r_2 в порожнині свердловини з коловою осьовою лінією в процесі її спуску або здійснення буріння. Бурильна колона може випинати під дією внутрішніх і зовнішніх сил, але, тим не менш, в процесі згинання вона по всій своїй довжині продовжує залишатися в контакті зі стінкою свердловини, поверхня Σ якої являється тороїдальною та описується рівняннями

$$\begin{aligned} X(u, v) &= a \sin v, \\ Y(u, v) &= Y_T(u) - a \cos v \sin[\varphi(u)], \\ Z(u, v) &= Z_T(u) + a \cos v \cos[\varphi(u)], \end{aligned} \quad (11)$$

де $X_T(u)=0$, $Y_T(u)=-R \cos u$, $Z_T(u)=R \sin u$ – координати осьової лінії каналової (тороїдальної) поверхні Σ ; R – радіус осьової лінії каналу; a – радіус твірного кола тору; $\varphi = \arctg(\partial Y_T / \partial Z_T)$ – кут нахилу твірного кола.

В даному випадку БК не є вільною, оскільки осьова лінія L лежить і ковзає по поверхні Σ . Тому геометрія кривої L визначається внутрішньою і зовнішньою геометрією Σ , які відомі і не змінюються з трансформацією кривої L . З цієї причини більш зручним виявляється, як і для прямолінійної свердловини, ввести додатковий тригранник $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, що рухається вздовж кривої L по поверхні Σ . Тоді можна використовувати узагальнений вектор Дарбу ω в формі (4). Де k_x – кривина

кривої L в площині ouy , k_y її кривина в площині xoz і k_z – кручення кривої, що обумовлене рухом тригранника уздовж кривої. Як і у випадку циліндричної поверхні Σ , завдяки тому, що крива L лежить на тороїдальній поверхні Σ , кривина k_x визначається як геодезична кривина k^{geod} (5) кривої L , а кривина k_y є нормальною кривиною k^{norm} (6) поверхні Σ . Ці змінні обчислюються через параметри a_{ij} і b_{ij} першої та другої квадратичних форм

$$\begin{aligned}\Phi_1(u, v) &= a_{11}(u, v)du^2 + 2a_{12}(u, v)dudv + a_{22}(u, v)dv^2, \\ \Phi_2(u, v) &= b_{11}(u, v)du^2 + 2b_{12}(u, v)dudv + b_{22}(u, v)dv^2,\end{aligned}\quad (12)$$

які визначають внутрішню і зовнішню геометрії тороїдальної поверхні Σ .

Після врахування відповідних геометричних співвідношень векторні рівняння нелінійного деформування колони (1) зводяться до вигляду

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dF_y}{ds} &= EI k_x k_z^2 - M_z k_x k_z + EI k_y' k_z + k_x F_z - f^{тяж} (\sin u \sin v \cos \theta + \cos u \sin \theta), \\ \frac{dF_z}{ds} &= -EI k_x k_x' - EI k_y k_y' - f^{тяж} (-\sin u \sin v \sin \theta + \cos u \sin \theta), \\ \frac{dk_x}{ds} &= -\frac{M_z}{EI} k_y + k_y k_z + \frac{1}{EI} F_y, \\ \frac{dv}{ds} &= v', \\ \frac{d(v')}{ds} &= k_x \frac{[(R + a \cos v)^2 (u')^2 + a^2 (v')^2]^{3/2}}{a(R + a \cos v) u'} - \sin v \left[\frac{2a^2 (v')^2 + (R + a \cos v)^2 (u')^2}{a(R + a \cos v)} \right] + \frac{u'' v'}{u'}, \\ \frac{du}{ds} &= \frac{\sqrt{1 - a^2 (v')^2}}{(R + a \cos v)}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Для аналізу явища втрати стійкості рівноваги та випинання БК, що лежить на дні каналу свердловини, необхідно рівняння (13) лінеаризувати в околі цього стану. В результаті додаткових перетворень побудовано лінеаризоване однорідне рівняння четвертого порядку

$$\begin{aligned} \delta v^{IV} + \left[\frac{1}{a(R + a)} - \frac{F_z}{EI} \right] \delta v'' - \frac{f^{тяж}}{EI} \cos \left(u_0 + \frac{s}{R + a} \right) \delta v' + \\ + \left[\frac{f^{тяж}}{aEI} \sin \left(u_0 + \frac{s}{R + a} \right) - \frac{F_z}{aEI(R + a)} \right] \delta v = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Воно має нетривіальний розв'язок при значенні $F_z(s)$ в його коефіцієнтах, яке перетворює його в вироджене. При цьому стан, що відповідає такому вигляду $F_z(s)$, є критичним. Тоді $F_z(s)$ є власною функцією рівняння (14), а його нетривіальний розв'язок $\delta v(s)$ – власною формою, що являє собою форму біфуркаційного випинання.

На рисунку 4 показані схеми розглянутих в роботі колових обрисів свердловини, що складають увігнуту ділянку дуги кола з горизонтальною дотичною на нижньому кінці (а), симетричну відносно вертикальної осі увігнуту ділянку дуги (б) та випуклу ділянку дуги з горизонтальною точкою підвісу (в). Значення кутів

охоплення для всіх цих дуг складали $\varphi = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (випадок *а*), $\varphi = 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ (випадок *б*) і $\varphi = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$, (випадок *в*), радіуси кривини даних дуг складали $R = 1146$ м для випадків *а* і *б* і $R = 286$ м для випадку *в*. Для радіусу міжтрубного каналу задавали значення $a = 0,03, 0,05, 0,1, 0,5$ м, досліджувались випадки спуску БК без врахування та із врахуванням ($\mu = 0,3$) сил тертя. В результаті чисельного моделювання знаходились значення осьових стискаючих сил $F_z(S)$ на нижньому кінці БК.

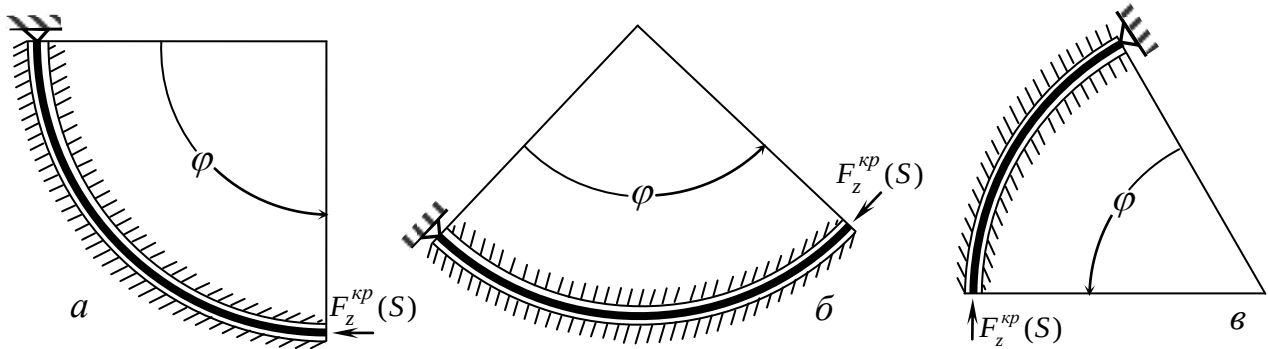


Рисунок 4 – Схеми розташування БК в свердловині кругового обрису

В таблиці 1 наведені результати для БК довжиною $S = 1200$ м, що вставлена в кругову свердловину радіусом $R = 1146$ м, в ній дані критичні значення осьової сили $F_z^{kp}(S)$, показані функції розподілення $F_z^{kp}(s)$ та форми втрати стійкості $\delta v(s)$. Можна бачити, що характер випинання БК залежить від функцій розподілу сили і положення її екстремального значення. Так, якщо $a = 0,5$ м і $f^{mer} = 0$, то БК розтягнена в верхній зоні в околі $s = 0$ м і стиснута в її нижній зоні в околі $s = S$. В цьому випадку критичне значення $F_z^{kp}(S) = -98,33$ кН, сформоване на краю $s = S$, є найбільшою стискаючою силою для всього інтервалу $0 \leq s \leq S$. Тому біфуркаційний вейвлет локалізується в крайовій зоні.

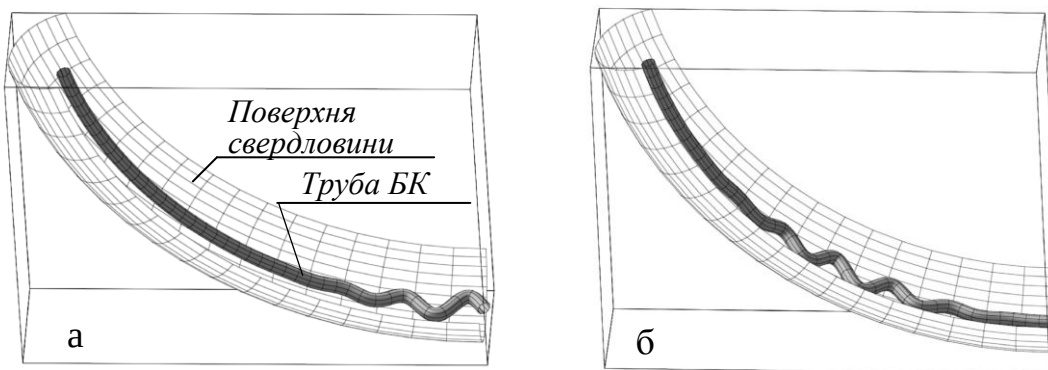
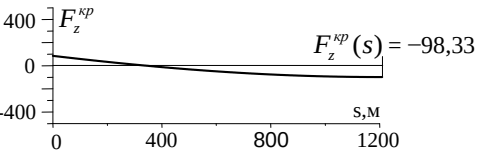
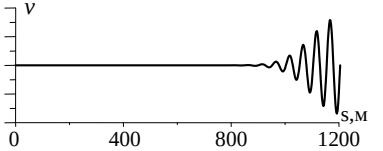
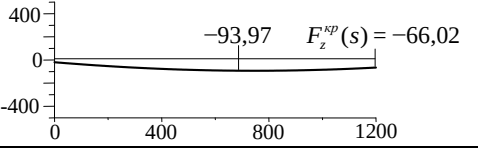
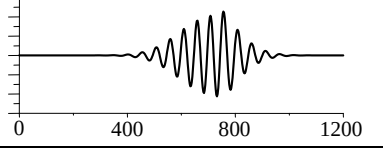
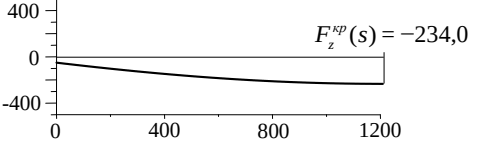
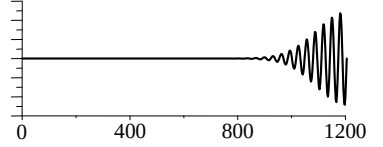
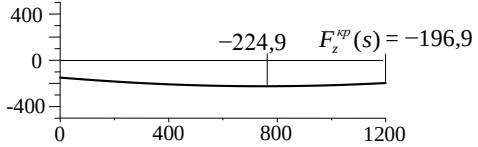
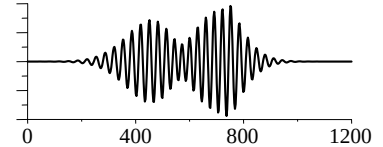
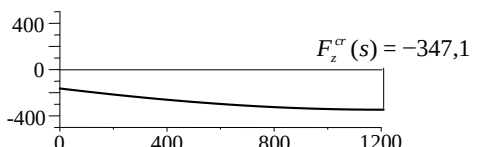
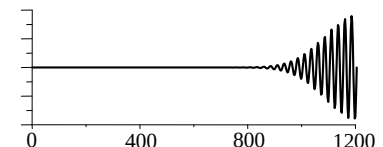
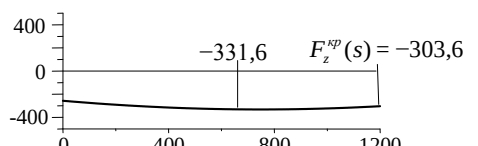
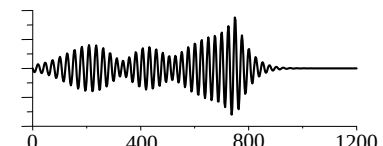
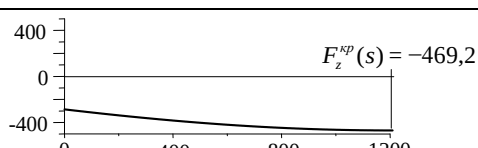
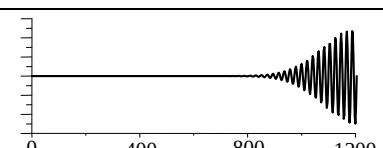
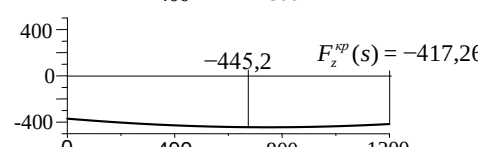
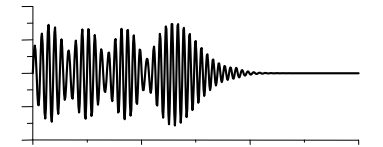


Рисунок 5 – Форми випинання БК у круговому каналі: а – безфрикційна модель нерухомої БК; б – модель рухомої БК з урахуванням сили тертя

Однак ситуація змінюється якщо $f^{mer} \neq 0$. Тоді максимальне стискаюче значення $F_z^{mer} = -93,97$ кН осьової сили зміщується у внутрішню зону БК і система стає сингулярно збуреною всередині її довжини. При цьому біфуркаційний вейвлет також зміщується всередину довжини БК. Схеми випинання БК для цих випадків

відображені на рис. 5. Зі зменшенням радіуса a форми втрати стійкості БК ускладнюються.

Таблиця 1 – Функції критичної сили $F_z^{kp}(s)$ та форми випинання $\delta v(s)$ бурильних колон для випадку $S=1200$ м, $R=1146$ м, $\varphi=60^\circ$

№	a , м	Сила тертя	Функція критичної осьової сили $F_z^{kp}(s)$, кН	Форма $\delta v(s)$ втрати стійкості
1	0,5	$f^{тер} = 0$	 $F_z^{kp}(s) = -98,33$	
		$f^{тер} \neq 0$	 $F_z^{kp}(s) = -66,02$	
2	0,1	$f^{тер} = 0$	 $F_z^{kp}(s) = -234,0$	
		$f^{тер} \neq 0$	 $F_z^{kp}(s) = -196,9$	
3	0,05	$f^{тер} = 0$	 $F_z^{kp}(s) = -347,1$	
		$f^{тер} \neq 0$	 $F_z^{kp}(s) = -303,6$	
4	0,03	$f^{тер} = 0$	 $F_z^{kp}(s) = -469,2$	
		$f^{тер} \neq 0$	 $F_z^{kp}(s) = -417,26$	

Аналогічні результати отримані для схем, представлених на рис. 4 б, в. Так, якщо задача розв'язується без врахування сил тертя, то випинання БК в свердловині за схемою рис. 4 б супроводжується утворенням високочастотного вейвлету в центральній зоні свердловини (рис. 6а), при опусканні БК сили тертя призводять до зміщення зони максимальних стискаючих зусиль F_z та зсуву біфуркаційного вейвлету, підтверджуючи властивості сингулярно збурених систем.

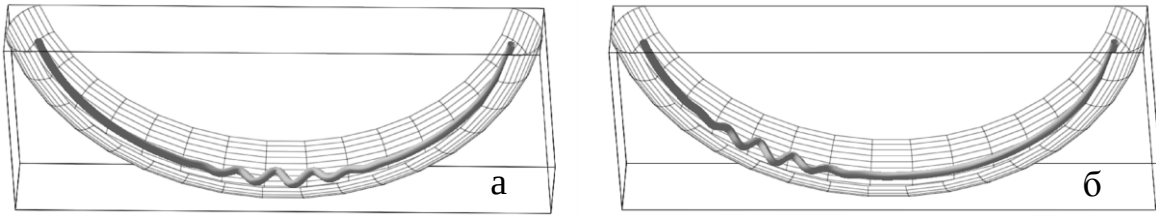


Рисунок 6 – Форми випинання БК у коловому каналі: а – без врахування сил тертя; б – з урахуванням сили тертя

В розділі чотири розглянута задача про випинання БК в криволінійній свердловині загального вигляду, коли її траєкторія може бути представлена гіперболічною кривою (рис. 7), що відповідає найбільш типовим властивостям її геометрії. Дійсно, вона має вертикальну дотичну у верхній точці, і її нижній кінець наближається до прямої лінії, апроксимуючи асимптоту гіперболи.

У нерухомій системі координат $OXYZ$ осьову лінію T свердловини зручно представити в загальній аналітичній формі

$$X^* = -\varepsilon \operatorname{ch} t \quad Y^* = 0 \quad Z^* = \lambda \operatorname{sh} t, \quad (15)$$

де ε – піввісь гіперболи, t – безрозмірний параметр, λ – величина, яка характеризує глибину свердловини.

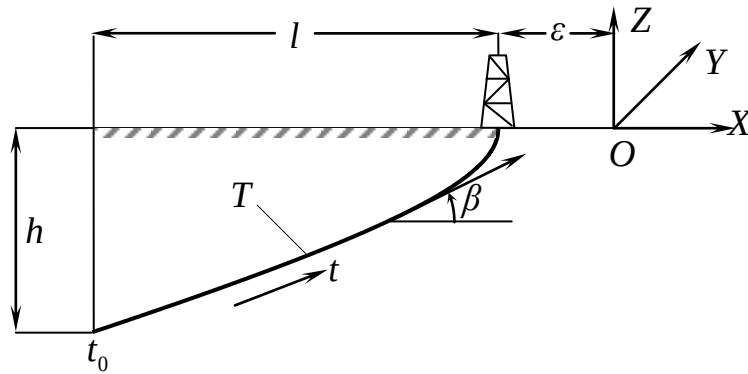


Рисунок 7 – Геометрична схема скерованої свердловини

Введемо каналову поверхню Σ з осьовою лінією T і твірними колами радіусу a , що дорівнюють міжтрубному зазору $a = (d_1 - d_2) / 2$, де d_1 і d_2 – діаметри свердловини і БК, відповідно. Параметризуємо її параметром u , пов'язаним з лінією T свердловини, і параметром v , який задає

положення точки на твірному колі.

Для побудови рівняння випинання, рівняння (1) лінеаризовані в околі $v = 0$

$$\begin{aligned} d\delta F_x / ds &= -\delta k_y F_z - k_y \delta F_z + \delta k_z F_y + k_z \delta F_y - \delta f_x, \\ d\delta F_y / ds &= -\delta k_z F_x - k_z \delta F_x + \delta k_x F_z + k_x \delta F_z - \delta f_y, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} d\delta F_z / ds &= -\delta k_x F_y - k_x \delta F_y + \delta k_y F_x + k_y \delta F_x - \delta f_z, \\ d\delta M_x / ds &= -\delta k_y M_z - k_y \delta M_z + \delta k_z M_y + k_z \delta M_y + \delta F_y, \\ d\delta M_y / ds &= -\delta k_z M_x - k_z \delta M_x + \delta k_x M_z + k_x \delta M_z - \delta F_x, \\ d\delta M_z / ds &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Прирости зовнішніх розподілених сил δf_x , δf_y , δf_z , що входять в ці рівняння, являють собою варіації суми компонент сил тяжіння $\mathbf{f}^{\text{тяж}}$ та тертя $\mathbf{f}^{\text{тер}}$:

Щоб визначити компоненти вектора $\mathbf{f}^{\text{тяж}}$, представимо його в системі відліку $oxyuz$

$$\mathbf{f}^{тяж} = -f^{тяж} \cos \beta \cos \nu \mathbf{i} + f^{тяж} (-\sin \beta \sin \zeta + \cos \beta \sin \nu \cos \zeta) \mathbf{j} + \\ + f^{тяж} (-\sin \beta \cos \zeta - \cos \beta \sin \nu \sin \zeta) \mathbf{k},$$

де $f^{тяж} = \pi(r_1^2 - r_2^2)(\gamma_{cm} - \gamma_{pid})g$; r_1, r_2 – зовнішній і внутрішній радіуси труби БК відповідно; $\gamma_{cm}, \gamma_{pid}$ – густини матеріалу і промивної рідини; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

В даному випадку $\nu = 0, \zeta = 0$, тому

$$f_x^{тяж} = -f^{тяж} \cos \beta, \quad f_y^{тяж} = 0, \quad f_z^{тяж} = -f^{тяж} \sin \beta.$$

У збуреному стані величини ν і ζ набувають малі збурення $\delta \nu$ і $\delta \zeta = ad\delta \nu / ds$, тому

$$\delta f_x^{тяж} = 0, \quad \delta f_y^{тяж} = f^{тяж} (-a \sin \beta d\delta \nu / ds + \cos \beta \delta \nu), \quad \delta f_z^{тяж} = 0.$$

Підкреслимо, що тут для постановки задачі одночасно використовуються дві незалежні змінні. Геометрія свердловини задається за допомогою безрозмірного параметра t , а рівняння рівноваги – з використанням натурального параметра s .

Зв'язок між ними задається рівнянням

$$s(t) = \int_{t_0}^t D d\zeta,$$

де $D = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ – метричний множник. Для випадку, що розглядається він запишеться у вигляді $D = \sqrt{(\varepsilon \text{sh} \zeta)^2 + (\lambda \text{ch} \zeta)^2}$, де ζ – змінна проміжного інтегрування.

Тоді кривини поверхні S виражаються через параметри першої та другої квадратичних форм (12):

$$k_1 = \frac{\varepsilon \lambda (\text{ch}^2 t - \text{sh}^2 t)}{(\varepsilon^2 \text{sh}^2 t + \lambda \text{ch}^2 t)^{3/2}}, \quad k_2 = \frac{1}{a}, \quad (18)$$

і остаточне рівняння втрати стійкості зводиться до вигляду

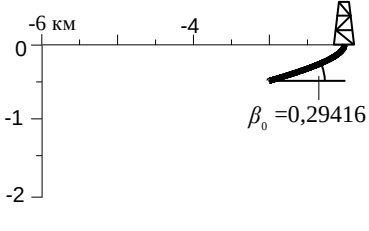
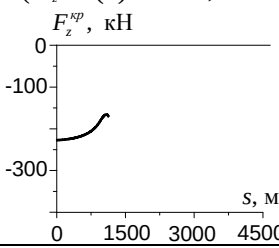
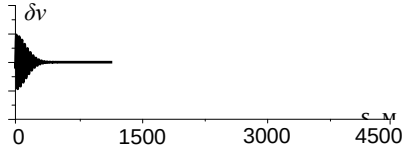
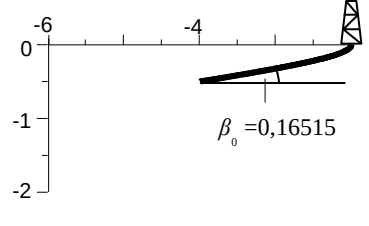
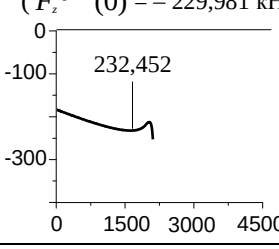
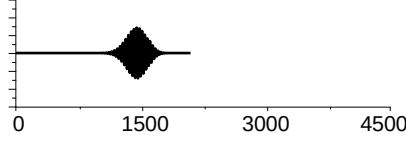
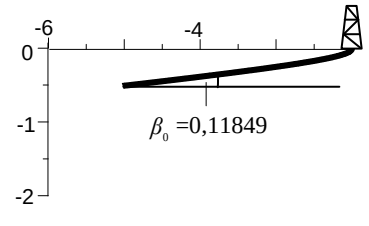
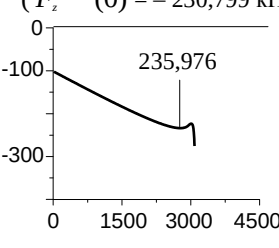
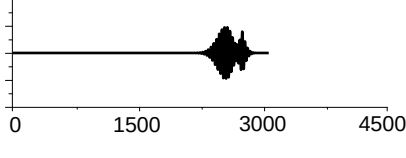
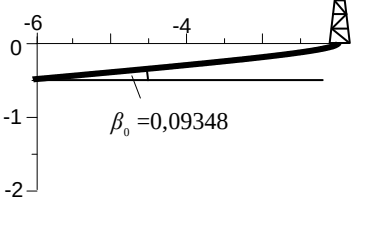
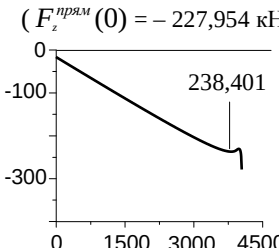
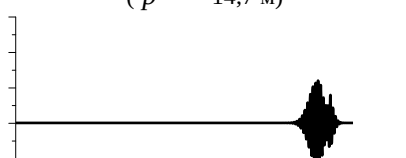
$$EI \frac{d^4 \delta \nu}{ds^4} + \frac{EI}{a} \frac{d^2}{ds^2} \left\{ \frac{\dot{\beta}}{a_{11}} [(\lambda \text{ch} t \sin \beta - \varepsilon \text{sh} t \cos \beta) + a\dot{\beta}] \delta \nu \right\} - EI(\varepsilon^2 + \lambda^2) \frac{d^2}{ds^2} \left\{ \frac{\text{sh} t \text{ch} t}{(a_{11})^{3/2}} \frac{d\delta \nu}{ds} \right\} - \\ - F_z \frac{d^2 \delta \nu}{ds^2} + \frac{F_z(\varepsilon^2 + \lambda^2) \text{sh} t \text{ch} t}{(a_{11})^{3/2}} \frac{d\delta \nu}{ds} - F_z \frac{\dot{\beta}}{aa_{11}} [(\lambda \text{ch} t \sin \beta - \varepsilon \text{sh} t \cos \beta) + a\dot{\beta}] \delta \nu - \\ - f^{тяж} \left(-\sin \beta d\delta \nu / ds + \frac{\cos \beta}{a} \delta \nu \right) = 0, \quad 0 \leq s \leq S. \quad (19)$$

Для встановлення загальної закономірності випинання БК в криволінійних свердловинах були обрані їх траєкторії з різними обрисами та розмірами. Розглянуті приклади дозволяють виявити загальні особливості явищ випинання БК в криволінійних свердловинах. Одна з них полягає в можливості втрачати стійкість з утворенням гармонійних вейвлетів в найнесподіваніших місцях довжини БК. Вона обумовлена початковою невизначеністю осьової сили тертя $f_z^{тер} (s)$, що генерується при операціях спуску або підйому колони. При її дії спільно з розподіленою силою

тяжіння $f_z^{тяж}(s)$ і крайовою осьовою силою $F_z(0)$ при $s=0$ колона може бути частково стиснута, частково розтягнута, що так само ускладнює її аналіз. Щоб вивчити ці нюанси для дослідження були обрані свердловини з різними нахилами траєкторій, значеннями її глибини та довжини.

В таблиці 2 наведені результати досліджень для порівняно пологих траєкторій. В ній показані форми траєкторій свердловин, графіки функцій осьових сил $F_z(s)$ та форми втрати стійкості $\delta v(s)$. Вказані також значення критичних осьових сил $F_z(0)$.

Таблиця 2 – Характеристики втрати стійкості БК в пологих свердловинах

Задача №	Осьова лінія свердловини	Функції $F_z^{kp}(s)$ критичної сили	Форма $\delta v(s)$ випинання
1	 $\beta_0 = 0,29416$	$F_z^{kp}(0) = -227,340$ кН ($F_z^{прям}(0) = -225,229$ кН) 	$p^{крив} = 16,6$ м ($p^{прям} = 16,3$ м) 
2	 $\beta_0 = 0,16515$	$F_z^{kp}(0) = -183,999$ кН ($F_z^{прям}(0) = -229,981$ кН) 	$p^{крив} = 15,9$ м ($p^{прям} = 15,3$ м) 
3	 $\beta_0 = 0,11849$	$F_z^{kp}(0) = -104,552$ кН ($F_z^{прям}(0) = -230,799$ кН) 	$p^{крив} = 17,05$ м ($p^{прям} = 16,3$ м) 
8	 $\beta_0 = 0,09348$	$F_z^{kp}(0) = -16,894$ кН ($F_z^{прям}(0) = -227,954$ кН) 	$p^{крив} = 15$ м ($p^{прям} = 14,7$ м) 

Представляє інтерес підтвердження отриманих результатів шляхом порівняння їх із іншими теоретичними даними. Беручи до уваги, що досі проблема глобальної стійкості БК в криволінійній свердловині не завершена, виявляється більш зручним розгляд деяких окремих випадків, зокрема, як зазначено вище, коли

обрис гіперболічної лінії L колони наближається до прямої на нижній ділянці свердловини, де функція $F_z(0)$ екстремальна. Тоді, цілком природно, що в цьому випадку випинання БК повинно відбуватися значною мірою аналогічно її втраті стійкості в похилому прямолінійному каналі. Щоб протестувати це припущення, виконані розрахунки випинання БК в похилих прямолінійних каналах за допомогою наведеного в розділі 2 рівняння (9). Вони підтвердили адекватність моделей, що зіставлялися.

Додаток А містить список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів. У **Додатку В** наведені довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлені та розв'язані нові актуальні наукові задачі про моделювання процесів втрати стійкості бурильних колон в криволінійних каналах глибоких свердловин при різних значеннях їх геометричних параметрів і врахуванні фактору тертя.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На базі огляду вітчизняних та закордонних публікацій зроблено висновок, що до теперішнього часу відсутні теоретичні методи моделювання явищ біфуркаційного випинання бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. Є лише інженерні підходи, що базуються на застосуванні спрощених припущень про геометрію свердловини та характер випинання, а також про контактну взаємодію між колоною та стінкою свердловини. Як правило, розглядаються тільки прямолінійні свердловини, а форма втрати стійкості задається (вгадується).

2. Зроблено висновок, що основною причиною відсутності в науковій літературі постановок і розв'язків задач визначення критичних станів БК є їх суттєва складність, яка зумовлена великою довжиною колони, та ефектами контактної взаємодії між колоною та стінкою свердловини. У зв'язку з чим поставлені крайові задачі на власні значення стають сингулярно збуреними, а диференціальні рівняння, що їх описують, набувають так звану "обчислювальну жорсткість", що істотно ускладнює методику їх розв'язання. Відмічена особлива роль фрикційних ефектів в загальному балансі критичних впливів на колону, які сприяють виникненню прихватів і інваріантних станів бурильних колон в криволінійних свердловинах

3. У дисертації запропоновані нові математичні моделі та розроблені нові методи теоретичного дослідження процесів випинання бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. Вони базуються на виборі для їх опису теорії гнучких криволінійних стрижнів. Використання даної теорії спільно з застосуванням методів диференціальної геометрії, теорії каналових поверхонь та спеціальних систем відліку (рухомих триєдрів) дало можливість розділити шукані змінні та окремо знаходити їх в певній послідовності. В результаті проміжного виключення з рівнянь невідомих реакцій в'язей (сил контактної взаємодії між колоною та стінкою свердловини) вдалося побудувати нову (модифіковану) модель деформування гнучких криволінійних стрижнів в криволінійних каналах, в якій фігурує лише одна шукана змінна, при цьому порядок диференціальних рівнянь знижено з дванадцятого до четвертого.

4. Методами будівельної механіки аналізу стійкості пружних систем побудовані лінеаризовані однорідні рівняння (безфрикційна та фрикційна моделі) біфуркаційного випинання бурильної колони в каналах свердловин з прямолінійною, коловою та криволінійною загальною вигляду осьовими лініями.

5. Виконані чисельні дослідження стійкості бурильних колон в прямолінійних та кругових каналах, а також в каналах зі змінними значеннями умов нахилу та кривин їх осьових ліній для різних величин глибини свердловини та її віддалень від бурильної установки, а також різних величин коефіцієнта тертя. Знайдені критичні значення зовнішніх впливів та побудовані форми втрати стійкості.

6. Доведено, що якщо кут нахилу β траєкторії свердловини в її нижній зоні перевищує значення кута тертя $\arcsctg \mu$ колони об її стінку, то форма втрати стійкості має вигляд коротко хвильового крайового ефекту. Для свердловин з кутом нахилу нижньої ділянки, меншим кута тертя, форми втрати стійкості мають вигляд високочастотних вейвлетів, зміщених в верхню зону траєкторії свердловини. Помічений також суттєвий вплив на формоутворення біфуркаційної моди фактору тертя, що сприяє непередбаченому перерозподілу зон втрати стійкості.

7. Отримані результати є новими, вони можуть бути використані в практиці буріння глибоких свердловин на етапах їх проектування та проходки.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Монографія

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

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

2. Shlyun N.V. Critical buckling of drill strings in cylindrical cavities of inclined bore-holes / N. Musa, V. Gulyayev, N. Shlun // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2016. – V. 6. – P. 25 – 38. **(США)**.

3. Shlyun N.V. Modeling the energy-saving regimes of curvilinear bore-hole drivage. / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, E.N. Andrusenko, N.V. Shlyun // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2015. – Vol. 137, No 1. – P. 011402–1–011402–8. **(США)**.

4. Shlyun N.V. Critical buckling of drill strings in curvilinear channels of directed bore-holes. / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, E.N. Andrusenko, N.V. Shlyun // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – Vol. 129, No 1. – P. 168–177. **(США)**.

5. Shlyun N.V. Influence of friction on buckling of a drill string in the circular channel of a bore hole / V.I. Gulyayev, N.V. Shlyun // Petroleum Science. – 2016. – V.13. – P. 698 – 711. **(КНР)**.

6. Шлюнь Н.В. Критические состояния бурильных колонн в каналах наклонно направленных скважин / В.И. Гуляев, О.М. Андрусенко Н.В. Шлюнь //Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2016. – №1. – С. 174 – 185. **(РФ)**.

7. Shlyun N.V. Global analysis of drill string buckling in the channel of a curvilinear bore-hole / V.I. Gulyayev, N.V. Shlyun // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – V.40. – P. 168 – 178. **(Нідерланди)**.

8. Shlyun N.V. Theoretical modelling of post – buckling contact interaction of a drill string with inclined bore-hole surface / V.I. Gulyayev, E.N. Andrusenko, N.V. Shlyun // Structural Engineering and Mechanics. – 2014. – Vol.49, No 4. – P. 427–448. **(Корея)**.

Статті у фахових виданнях

9. Shlyun N.V. Differential “stiff-string” model for drag and torque simulation in deviated bore-holes. / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, E.N. Andrusenko, N.V. Shlyun // Нафтогазова промисловість України. – 2013. – № 6. – С. 17–19.

10. Шлюнь Н.В. Біфуркаційне випинання бурильних колон в криволінійних свердловинах / Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. – 2017. – №. 1(37). – С. 467-473.

11. Шлюнь Н.В. Вплив сили тертя на біфуркаційне випинання бурильних колон в прямолінійних свердловинах / Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. – 2016. – №. 1(34). – С. 561 –569.

12. Шлюнь Н.В. Прочность конструкций обсадных колонн под действием нагрузок гидроразрыва / В.В. Гайдайчук, С.Н. Худолий, Н.В. Шлюнь // Будівельні конструкції. – Міжвідомчий науковий збірник. – Київ. ДП НДІБК. – 2016. – Вип. 83. Кн. 2. – С.333 – 338.

13. Шлюнь Н.В. Комп'ютерне моделювання випинання бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. / Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. – 2015. – №. 1(31). – С. 574 –580.

14. Шлюнь Н.В. Теоретическое моделирование наименее энергозатратных режимов бурения сверхглубоких криволинейных скважин. / В.И.Гуляев, В.В. Гайдайчук, О.М. Андрусенко, Н.В. Шлюнь // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2014. № 1. – С. 10–16

15. Шлюнь Н.В. Інваріантні стани бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. / В.І. Гуляєв, Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. – 2013. – №. 28. Частина 2. – С. 116 –123.

16. Шлюнь Н.В. Геометричне моделювання геодезичних кривих на каналових поверхнях / О.М. Андрусенко, Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – №. 26. Частина 2. – С. 396 – 400.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

17. Shlyun N. Computer Simulation of the Least Energy Consuming and Emergency-Free Regimes of Drilling of Hyper Deep Curvilinear Bore-Holes / V. Gulyayev, E. Andrusenko, N.Shlyun // SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition. – Russia, Moscow, 15 – 17 October, 2013.

18. Шлюнь Н. Біфуркаційні стани бурильних колон у каналах криволінійних свердловин / Н. Шлюнь // 12-й Міжнародний Симпозіум Українських Інженерів-Механіків у Львові, 28-29 травня 2015 р., Львів – С. 30.

19. Шлюнь Н.В. “STIFF-STRING” модель для комп'ютерного моделювання надзвичайних ситуацій при бурінні криволінійних свердловин / Н.В. Шлюнь //

Міжнародна наукова конференція “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів”. – Рівне: РВВ РДГУ, 2015. –182–183.

20. Шлюнь Н. Сингулярно возмущенные задачи выпучивания бурильных колон в каналах криволинейных скважин / Н. Шлюнь // Актуальные проблемы инженерной механики / Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции. – Одесса: «Внешрекламсервис» –2016. –С. 240 –242.

21. Шлюнь Н.В. Математичні особливості задачі про моделювання випинання бурильних колон криволінійних свердловин / Н.В. Шлюнь //LXXIII наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2017. – С. 453.

22. Шлюнь Н.В. Вплив сили тертя на втрату стійкості бурильних колон в каналах криволінійних свердловин / Шлюнь Н.В. // LXXII наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2016. – С. 436-437.

23. Шлюнь Н.В. Стійкість бурильних колон в каналах криволінійних свердловин / Н.В. Шлюнь // LXXI наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2015. – С. 465.

24. Шлюнь Н.В. Інваріантні стани бурильних колон в каналах криволінійних свердловин / Гуляєв В.І., Шлюнь Н.В. // LXX наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2014. – С. 417.

Патенти:

25. Пат. 81077 Україна, МПК Е 21В 7/06, Е 21В 19/00 Спосіб мінімізації енерговитрат і аварій при проведенні спуско-підіймальних операцій в процесі буріння похилоскерованих свердловин / [В.І. Гуляєв, П.З. Луговой, О.М. Андрусенко, Н.В Шлюнь.]; заявник та власник і-т механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. –№ у 2012 12876 12.11.2012: опубл. 25.06.2013, Бюл. №12.

26. Пат. 89561 Україна, МПК Е 21В 7/06, Е 21В 19/00 Спосіб комп'ютерного визначення зони прихвату бурильної колони похило-скерованих свердловин / [В.І. Гуляєв, П.З. Луговой, О.М. Андрусенко, та ін.] заявник та власник і-т механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України/ –№ у 2013 13617 22.11.2013: опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.

АНОТАЦІЇ

Шлюнь Н.В. Стійкість бурильних колон в криволінійних свердловинах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ, 2017.

В дисертації запропоновані нові математичні моделі та розроблені нові методи теоретичного дослідження процесів випинання бурильних колон в каналах криволінійних свердловин. Вони базуються на виборі для їх опису теорії гнучких криволінійних стрижнів. Використання даної теорії спільно з застосуванням методів

диференціальної геометрії, теорії каналових поверхонь та спеціальних систем відліку (рухомих триєдрів) дало можливість розділити шукані змінні та окремо знаходити їх в певній послідовності, при цьому порядок диференціальних рівнянь знижено до четвертого.

Методами будівельної механіки аналізу стійкості пружних систем побудовані лінеаризовані однорідні рівняння (безфрикційна та фрикційна моделі) біфуркаційного випинання бурильної колони в каналах свердловин з прямолінійною, коловою та криволінійною загального вигляду осьовими лініями.

Виконані чисельні дослідження стійкості бурильних колон в цих свердловинах із різними значеннями кутів нахилу та кривин їх осьових ліній для різних величин глибини свердловини та її віддалень від бурильної установки, а також різних величин коефіцієнта тертя. Знайдені критичні значення зовнішніх впливів та побудовані форми втрати стійкості. Показано, що вони мають форми крайових ефектів або короткохвильових вейвлетів, що локалізовані у внутрішніх зонах свердловини.

Ключові слова: бурильна колона, криволінійна свердловина, каналова поверхня, стійкість рівноваги, біфуркаційне випинання.

Шлюнь Н.В. Устойчивость бурильных колонн в криволинейных скважинах. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет, Киев, 2017.

В диссертации на базе обзора отечественных и зарубежных публикаций сделан вывод, что к настоящему времени отсутствуют теоретические методы моделирования явлений бифуркационного выпучивания бурильных колонн в каналах криволинейных скважин. Имеются только инженерные подходы, основанные на применении упрощенных предположений о геометрии скважины и характере выпучивания, а также о контактном взаимодействии между колонной и стенкой скважины. Как правило, рассматриваются только прямолинейные скважины, а форма потери устойчивости задается. Показано, что основная причина сложности задач устойчивости криволинейных бурильных колонн обусловлена большой длиной колонны и эффектами контактного взаимодействия между колонной и стенкой скважины. В связи с чем поставлены краевые задачи на собственные значения становятся сингулярно возмущенными, а описывающие их дифференциальные уравнения получают так называемую "вычислительную жесткость", что существенно усложняет методику их решения. Отмечена особая роль фрикционных эффектов в общем балансе критических воздействий на колонну, способствующих возникновению прихватов и инвариантных состояний бурильных колонн в криволинейных скважинах.

В диссертации предложены новые математические модели и разработаны новые методы теоретического исследования процессов выпучивания бурильных колонн в каналах криволинейных скважин. Они базируются на выборе для их описания теории гибких криволинейных стержней. Использование данной теории совместно с применением методов дифференциальной геометрии, теории каналовых

поверхностей и специальных систем отсчета (подвижных триедров) позволило разделить искомые переменные и отдельно находить их в определенной последовательности, при этом порядок дифференциальных уравнений снижен до четвертого.

Методами строительной механики анализа устойчивости упругих систем построены линеаризованные однородные уравнения (безфрикционная и фрикционная модели) бифуркационного выпучивания бурильной колонны в каналах скважин с прямолинейной, круговой и криволинейной общего вида осевыми линиями.

Выполнены многочисленные исследования устойчивости бурильных колонн в этих скважинах с различными значениями углов наклона и кривизны их осевых линий для различных величин глубины скважины и ее отдаления от бурильной установки, а также различных величин коэффициента трения. Найдены критические значения внешних воздействий и построены формы потери устойчивости. Показано, что они имеют формы краевых эффектов или коротковолновых вейвлетов, локализованных во внутренних зонах скважины. Замечено также существенное влияние на формообразование бифуркационной моды фактора трения, способствующего к непредвиденному перераспределению зон потери устойчивости.

Ключевые слова: бурильная колонна, криволинейная скважина, каналовая поверхность, устойчивость равновесия, бифуркационное выпучивание.

Shlyun N.V. Stability loss of drill strings in the channels of curvilinear bore-holes. – Manuscript.

The thesis for the candidate of technical science degree on specialty 05.23.17 – Mechanics of Structures. – National Transport University, Kyiv, 2017.

In the dissertation new mathematic models and analysis methods are elaborated for investigation of the processes of drill strings buckling in channels of curvilinear bore-holes. They are based on the choice of the theory of curvilinear flexible rods for their simulation. The use of this theory jointly with the methods of differential geometry, theory of channel surfaces and special reference systems (moving trihedron) permitted to divide the unknown variables and to determine them separately in the certain sequence. As this takes place, the differential equations system is reduced to four.

Through the application of methods of structural mechanics for analysis of elastic system stability, the linearized homogeneous equations (frictionless and frictional models) are constructed for computer simulation of the drill string buckling in the bore-hole channels with rectilinear, circumferential, and general curvilinear axis lines.

The numerical analysis of the drill string buckling in the bore-holes with variable angles of the trajectories inclinations and curvatures values are performed for different values of the bore-hole depths and their extensions from the rigs, as well as values of the friction coefficient. The critical values of the external influences are found, the modes of stability loss are constructed. It is shown that they have the modes of boundary effects or shortpitched wavelets localized in the internal zones of the bore-holes.

Key words: drill string, curvilinear bore-hole, channel surface, equilibrium stability, bifurcational buckling.