УДК 539.41:622.245.3

ВЗАЄМОДІЯ КОЛОНИ ОБСАДНИХ ТРУБ ЗІ СТІНКАМИ ПОХИЛОЇ, ВИКРИВЛЕНОЇ І ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ДІЛЯНОК СВЕРДЛОВИНИ

І.І. Палійчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (03422) 44277,
e-mail: p u b l i c @ n u n g . e d u . u a

Для дослідження взаємодії обсадної колони зі стінками похилої, викривленої за дугою кола і горизонтальної ділянок свердловини застосовано теорію довгого пружного стрижня. Розподіл реакції стінок свердловини та осьової сили (розтягу чи стиску) вздовж колони знайдено розв'язанням відповідної системи диференціальних рівнянь. Отримані результати дозволяють визначати довжину стисненої нижньої частини колони за різних конфігурацій свердловини та умов тертя.

Ключові слова: обсадна колона; похила, викривлена, горизонтальна свердловина; взаємодія колони і свердловини; реакція стінок; тертя; осьова сила; нейтральний перетин.

Для исследования взаимодействия обсадной колонны со стенками наклонной, искривленной по дуге окружности и горизонтальной скважины применена теория длинного упругого стержня. Распределение реакций стенок скважины и осевой силы (растяжения или сжатия) вдоль колонны найдено решением соответствующей системы дифференциальных уравнений. Полученные результаты позволяют определять длину сжатой нижней части колонны при разных конфигурациях скважины и условиях трения.

Ключевые слова: обсадная колонна; наклонная, искривленная, горизонтальная скважина; взаимодействие колонны и скважины; реакция стенок; трение; осевая сила; нейтральное сечение.

The theory of a long elastic rod has been applied to study the interaction of a casing string with walls of an inclined, curved along a circle arc and a horizontal borehole. The distribution of wellbore wall reactions and the axial force (tension or compression) along the casing column has been revealed by solving the corresponding system of differential equations. The obtained results allow us to determine the length of the compressed lower part of the column at different well configurations and friction conditions.

Key words: casing string; inclined, curved, horizontal borehole; interaction of the column and the well; reaction of walls; friction; axial force; neutral cross section.

Вступ

Для надійного і довготривалого видобування енергоносіїв нафтові та газові свердловини кріплять колонами сталевих обсадних труб. Обсадна колона захищає стінки від руйнування, ізолює різнорідні гірські шари з різними пластовими тисками від перетікання надрових флюїдів, забезпечує умови для видобування нафти чи газу з великих глибин. Тому основними показниками працездатності колони труб є її міцність та герметичність.

Свердловина може кріпитися проміжними обсадними колонами, які не досягають привибійної зони. Найбільш відповідальною є експлуатаційна колона, яка з'єднує устя свердловини з продуктивними пластами покладів вуглеводнів. Вона може досягати глибини 4-7 км при довжині колони труб 6-9 км, зокрема у похило скерованих та горизонтальних свердловинах. І при цьому для виконання свого завдання колона труб повинна бути суцільною, міцною і герметичною.

Як правило, проект свердловини, включно з її похилими та горизонтальними ділянками, розробляють в одній площині z0*x*, де 0*z* – вертикальна вісь, напрямлена вниз, 0*x* – горизонтальна вісь у директивному напрямку буріння (за азимутом на продуктивний пласт). Зрозуміло, що під час буріння свердловини виникають відхилення від директивної вертикальної площини, які постійно виправляються технічними і технологічними засобами. У результаті свердловина може складатись з однієї чи кількох достатньо протяжних частин, що містять похилі, викривлені і горизонтальні ділянки, які можна вписати в одну площину з прийнятною точністю.

Аналіз відомих досліджень взаємодії колони труб зі стінками свердловини

Для дослідження взаємодії бурильних труб зі стінками свердловини група азербайджанських науковців під керівництвом М. П. Гулізаде [1] записала повну систему диференціальних рівнянь механіки тонких стрижнів, яким задовольняє колона труб у просторово викривленій свердловині. Система цих рівнянь не була розв'язана, але на її основі був зроблений висновок лиш про те, що внаслідок взаємодії зі стінками свердловини на колону труб діє розподілений крутний момент за рахунок просторового викривлення свердловини. Цим аналітично був підтверджений той факт, що під час опускання бурильних труб відбувається прокручування елеватора, на якому підвішена колона.

У попередніх роботах цих же авторів для дослідження сил тертя при опусканні у похилу свердловину бурильна колона була розглянута як нерозтягувана важка нитка. Слід зауважити, що такий підхід є невиправданим, оскільки відповідна теорія вагомої нитки передбачає відсутність її опору при згинанні, що вступає у про-

тиріччя з реальною механікою колони бурильних чи обсадних труб.

Дослідженню сил опору під час руху колони труб у свердловині також присвячена робота М. М. Александрова [2]. Тут був застосований підхід геометричного описання бурильної колони при її силовій взаємодії зі стінками просторово викривленої свердловини, яка задавалась ділянками заздалегідь визначеної форми; при цьому розміщення розтягнутих і стиснених ділянок колони вважалось відомим. У результаті розрахункова модель бурильної колони не містить внутрішніх силових параметрів опору труб і не може вірогідно відображати напружено-деформований стан колони.

У роботі [2] прийнято термін "притискальна сила" для опису взаємодії колони труб зі стінками свердловини. Слід зауважити, що цей термін створює невірне уявлення про джерело походження цієї взаємодії. Первинною силою, що діє на колону, є її розподілена вага, джерелом якої є потенціальна енергія маси труб у гравітаційному полі Землі. А для опису взаємодії колони труб зі стінками свердловини слід застосовувати термін "сила реакції" чи "реакція стінок", який вказує на протидію чи зрівноважування сил ваги і саме який прийнято у механіці. У результаті взаємодії ваги труб і реакції стінок свердловини колона змінює форму, що породжує внутрішні сили опору у тілі труб, джерелом яких є потенціальна енергія деформації матеріалу труб.

Таким чином, залишається ще недостатньо дослідженим питання взаємодії колони труб при їх опусканні зі стінками непрямолінійної, викривленої свердловини.

Постановка задачі і мета роботи

З огляду на велику довжину (порівняно з діаметром) та викривлення свердловини обсадна колона аналітично представлена як довгий пружний стрижень [1, 3, 4]. Згідно із загальною теорією напружено-деформований стан гнучкого стрижня описується системою диференціальних рівнянь [3, 4], яка складається з 3-ох рівнянь рівноваги внутрішніх і зовнішніх сил, таких же 3-ох рівнянь для моментів, 3-ох кінематичних рівнянь та 3-ох рівнянь пружних згинальних моментів. Ці рівняння містять такі невідомі: 3 проекції внутрішніх сил на головні осі перерізу стрижня, такі ж 3 проекції внутрішніх моментів, 3 координатні кути Ейлера і 3 кривизни стрижня. Оскільки відомі розміри стрижня і його жорсткість на згин, то за допомогою останніх 3-ох рівнянь невідомі моменти у системі можна виключити, замінивши їх 3-ма кривизнами. Також аналіз показав [4], що рівняння рівноваги є однорідними відносно параметра жорсткості стрижня, тому сили і моменти, включно з розподіленими і зовнішніми, можна поділити на жорсткість EJ. Це рівнозначно розгляду довгого стрижня з одиничною жорсткістю на згин.

Виходячи з викладеного вище, у цій статті поставлена **мета** – аналітично дослідити взаємодію обсадної колони зі стінками похилих, викривлених і горизонтальних ділянок свердловини, розташованих в одній площині, на основі механіки довгих пружних стрижнів.

Основна система диференціальних рівнянь

Застосовуючи загальну систему диференціальних рівнянь гнучкого стрижня [3, 4] до випадку викривлення в одній площині, приймаємо, що його згин відбувається лише у вертикальній площині $z0x$, так що дотична до осі стрижня вісь t та головна вісь u інерції перерізу залишаються у площині згину. Тому у системі рівнянь відсутні проекції внутрішніх поперечної сили Q_v і згинального момента M_u (які відгинають стрижень з вертикальної площини) та скручувальний момент M_t, а також рівні нулю дві кривизни і два координатні кути (прецесії та чистого обертання). У результаті у системі залишаться лише два рівняння рівноваги сил у проекціях на дотичну і нормаль до осі стрижня, рівняння рівноваги згинальних моментів, кінематичне рівняння і рівняння пружного момента:

$$\begin{gathered}\frac{dQ_t}{ds} - q\cdot Q_u + F_t = 0,\\ \frac{dQ_u}{ds} + q\cdot Q_t + F_u = 0,\\ \frac{dM_v}{ds} + Q_u = 0,\\ \frac{d\vartheta}{ds} = q,\\ M_v = q\cdot EJ,\end{gathered} \qquad (1)$$

де Q_t – осьова сила (проекція внутрішньої сили на дотичну t);

Q_u – поперечна сила (проекція внутрішньої сили на вісь інерції u);

M_v – внутрішній згинальний момент;

F_t і F_u – проекції зовнішніх розподілених навантажень відповідно на дотичну t і на головну вісь інерції u;

ϑ – зенітний кут[1] дотичної до осі стрижня;

$q = R^{-1}$ – кривизна[1] ділянки стрижня;

R – радіус кривизни;

s – координата перетину стрижня вздовж його викривленої осі;

E – модуль пружності матеріалу;

J – головний момент інерції.

За допомогою останнього рівняння виключимо із системи момент M_v і введемо нові позначення силових чинників:

$$t = \frac{Q_t}{EJ},\ u = \frac{Q_u}{EJ},\ q = \frac{M_v}{EJ}. \qquad (2)$$

Розподілене навантаження j, що діє на колону, – це вага одиниці довжини колони, включаючи вагу труб, муфт, центраторів та іншого

[1] Тут збережені позначення кута нутації ϑ і кривизни q, запропоновані Л. Ейлером та використані Г. Кірхгофом.

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

колонного оснащення, спрямована вздовж осі *Oz* (вертикально вниз), за вирахуванням виштовхувальної сили бурового розчину, який залишається у свердловині:

$$j = \frac{g(\rho - \gamma)S}{EJ}, \qquad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина матеріалу труб;

γ – густина бурового розчину;

S – площа зведеного поперечного перерізу колони.

Початково прямолінійна колона труб отримує форму непрямолінійної осі свердловини. Це відбувається за рахунок сил реакції її стінок, які діють на стрижень і вигинають його. У першому наближенні вважаємо, що колона контактує зі стінками по усій довжині (нехтуємо малими зазорами між стінкою і трубою порівняно з великими відхиленнями осі від прямолінійної форми). Отже, крім ваги на стрижень діє реакція стінок $f(s)$, розподілена по його довжині за певним законом, внаслідок чого довгий пружний стрижень набуває заданої форми. Приймаємо, що розподілене навантаження f спрямоване по нормалі до криволінійної осі стрижня і є додатним, якщо його проекція на горизонталь має додатний напрямок.

Внаслідок контактування і тертя колони зі стінками при її русі у свердловині по дотичній до осі діє сила тертя, пропорційна величині розподіленої реакції f з коефіцієнтом тертя k_t. Таким чином, проекції розподілених навантажень ваги і реакції відповідно на дотичну t і на головну вісь інерції u можна виразити так:

$$\frac{F_t}{EJ} = j\cos\vartheta - k_t f\,,\ \frac{F_u}{EJ} = -j\sin\vartheta + f\,. \qquad (4)$$

Отже, колону труб як довгий пружний стрижень, зігнений внаслідок взаємодії зі стінками свердловини, викривленої в одній площині, можна описати такою неоднорідною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{gathered} u' + q\cdot t = j\sin\vartheta - f\,, \\ t' - q\cdot u = -j\cos\vartheta + k_t f\,, \\ q' + u = 0\,,\ \vartheta' = q\,, \end{gathered} \qquad (5)$$

де штрих позначає похідну функції за координатою s.

Далі проведено дослідження і розв'язання отриманої основної системи рівнянь для різних випадків конфігурації свердловини та умов тертя.

Прямолінійна ділянка свердловини без тертя (ідеалізований випадок)

На прямолінійній ділянці свердловини колона немає кривизни: $\vartheta' = 0$, тому відсутні згинальний момент і поперечна сила: $q = 0$, $u = 0$; коефіцієнт тертя $k_t = 0$. Підставивши ці значення, спростимо систему рівнянь (5):

$$f = j\sin\vartheta\,,\ t' = -j\cos\vartheta\,. \qquad (6)$$

Знаючи диференціал $dz = ds\cos\vartheta$, прямим інтегруванням знайдемо

$$t = -j\int\cos\vartheta\,ds + c = -j\,z + c\,,$$

де z – координата перетину стрижня по вертикалі (глибина);

c – стала інтегрування.

Гранична умова: до нижнього кінця колони прикладена осьова сила $t = T_Z$ при $z = Z$, де Z – вертикальна координата кінцевого перетину. Звідси $c = jZ + T_Z$.

Індексом Z позначена величина параметра при $z = Z$. Зокрема, на вільному кінці стрижня (на башмаку колони): $T_Z = 0$. Осьова сила

$$t = j(Z - z) + T_Z\,. \qquad (7)$$

Для прямолінійної похилої ділянки свердловини: $Z - z = L_Z\cos\vartheta$, де L_Z – довжина колони від даного перетину до кінця ділянки з координатою Z. Тому

$$t = jL_Z\cos\vartheta + T_Z\,. \qquad (8)$$

Тут осьова сила менша за вагу частини колони, розміщеної нижче від перетину, тому що вона обперта до стінки свердловини. Поперечна сила відсутня, тому що зовнішні сили зрівноважені (за рівнянням (6) – проекція ваги колони і реакція стінок свердловини).

Для вертикальної свердловини $\vartheta = 0$, тому реакція свердловини відсутня: $f = 0$, а осьова сила дорівнює вазі нижньої частини колони:

$$t = jL_Z + T_Z\,. \qquad (9)$$

Для горизонтальної свердловини $\vartheta = 90°$, тому $t = 0$, $T_Z = 0$, а реакція стінок: $f = j$; колона повністю обперта на свердловину. Якщо викривлена ділянка колони переходить у горизонтальну, то осьова сила зникає у перетині, де зникає кривизна.

Ділянка свердловини, вигнута за дугою кола, без тертя (ідеалізований випадок)

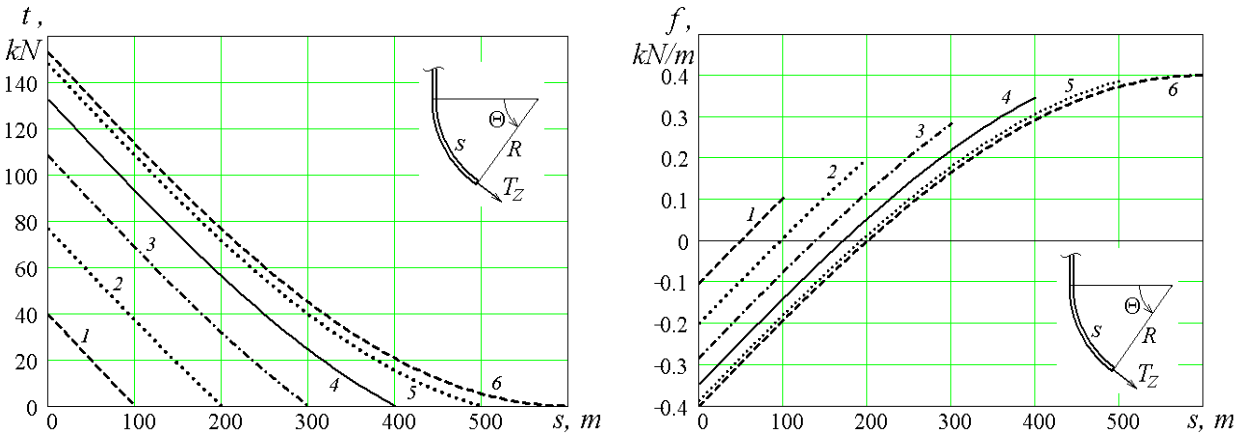
Радіус дуги $R = const$, тому кривизна колони і згинальний момент: $\vartheta' = q = R^{-1}$.

При переході від прямолінійної ділянки стрижня до вигнутої за дугою кола немає геометричного зламу осі, тому що у перехідному перетині дотичні співпадають. Але тут відбувається стрибок величини згинального момента, який є на дуговій ділянці і пропорційний кривизні, проте відсутній на прямолінійній ділянці. Це є наслідком ідеалізації задачі, у першу чергу, через описання кривої ідеальним колом. У реальній свердловині, діаметр якої дещо більший за колону, краї суміжних ділянок колони труб отримують кривизни, які змінюються від R^{-1} на дуговій ділянці до 0 на прямій.

Поперечна сила відсутня: $u = -q' = 0$. При $k_t = 0$ спрощена система (5) має вигляд:

$$f = j\sin\vartheta - t\cdot\vartheta'\,,\ t' = -j\cos\vartheta\,. \qquad (10)$$

Застосувавши диференціал $ds = R\,d\vartheta$, прямим інтегруванням, отримаємо:



а) б)

jEJ = 0,4 кН/м; R = 382 м; k_t = 0; T_Z = 0;
1 – Θ = 15°; 2 – Θ = 30°; 3 – Θ = 45°; 4 – Θ = 60°; 5 – Θ = 75°; 6 – Θ = 90°

Рисунок 1 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони залежно від зенітного кута Θ у кінці дугової ділянки свердловини

$$t = -jR\int \cos\vartheta\, d\vartheta + c = -jR\sin\vartheta + c.$$

Гранична умова: до нижнього кінця колони прикладена осьова сила $t = T_Z$ при $\vartheta = \Theta$, де Θ – значення зенітного кута на кінці ділянки при $z = Z$, звідки $c = jR\sin\Theta + T_Z$.

Отже, при нехтуванні тертям на дуговій ділянці свердловини осьова сила натягу колони та розподілена реакція стінок, яка створює її задану форму, визначаються так:

$$t = jR(\sin\Theta - \sin\vartheta) + T_Z,$$

$$f = j(2\sin\vartheta - \sin\Theta) - T_Z R^{-1}. \qquad (11)$$

Характер розподілу цих чинників показано на рис. 1 залежно від довжини дугової ділянки колони при переході від вертикальної до похилої свердловини. Тут зенітний кут зростає у межах $0 < \vartheta < \Theta$. Для обсадних труб діаметра 146 мм розраховано $jEJ = 0{,}34$ кН/м, для діаметра 168 мм – $jEJ = 0{,}44$ кН/м.

Розподіл параметрів t і f вздовж осі колони можна вважати лінійним, коли значення зенітного кута малі, тому що $\sin\vartheta = \vartheta$ (у радіанах) при $0 < \vartheta < 14°$ з похибкою, не більшою за 1% (при $\Theta < 32°$ відхилення від лінійності менше за 5%; при $\Theta < 45°$ – менше за 10%). Прикладання кінцевої сили T_Z за відсутності тертя змінить величину параметра на всій довжині колони на однакову величину (графіки на рис. 1 змістяться по вертикалі відносно нуля).

Додатна реакція стінок свердловини направлена до центра кривизни ($f > 0$), а від'ємна – назовні дуги кола ($f < 0$). Значення реакції стінок на краях ділянок відмінні від дійсних, тому що у розглянутій задачі до країв стрижня умовно прикладені згинальні моменти для отримання заданої однакової кривизни.

Розглянемо ділянку у вигляді дуги кола при переході від похилої свердловини до горизонтальної, для якої $\Theta = 90°$. Тут зенітний кут теж зростає у межах $\vartheta_0 < \vartheta < 90°$, де ϑ_0 – його значення на початку ділянки (це зенітний кут похилої свердловини). У горизонтальній свердловині $T_Z = 0$, тому осьова сила і реакції стінок виражаються так:

$$t = jR(1 - \sin\vartheta),\ f = j(2\sin\vartheta - 1). \qquad (12)$$

На рис. 2 показано характер розподілу цих чинників залежно від довжини дугової ділянки при переході від похилої до горизонтальної свердловини. Нелінійність їх розподілу особливо виявляється за великих значень зенітного кута. Значення реакції стінки прямолінійної і дугової ділянок свердловини не співпадають у перетині, що їх з'єднує, внаслідок представлення останньої дугою ідеального кола.

У практиці буріння і кріплення свердловин часто зустрічаються випадки переходу за дугою кола від похилої до вертикальної ділянки привибійної зони. На такій дуговій ділянці колони зенітний кут спадає від ϑ_0 до $\Theta = 0$, тому $\vartheta' < 0$, а диференціал $ds = -R\,d\vartheta$, у результаті чого розв'язок спрощеної системи рівнянь такий:

$$t = jR\sin\vartheta + T_Z,\ f = 2j\sin\vartheta + T_Z R^{-1}. \qquad (13)$$

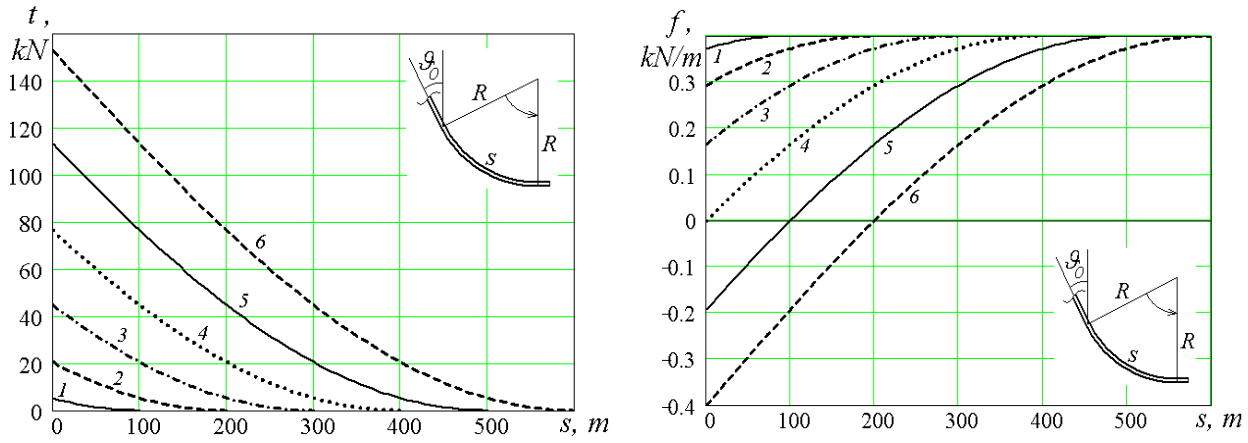
На рис. 3 показано характер розподілу цих чинників залежно від довжини дугової ділянки при переході від похилої до вертикальної свердловини.

Прямолінійна ділянка свердловини з врахуванням тертя

Дію сил тертя на колону з боку стінок свердловини враховуємо за умовою, що коефіцієнт тертя у межах ділянки колони однаковий: $k_t = const$, $0 < k_t < 1$.

У прямолінійної колони кривизна відсутня: $\vartheta' = 0$, тому відсутні згинальний момент і поперечна сила: $q = 0$, $u = 0$.

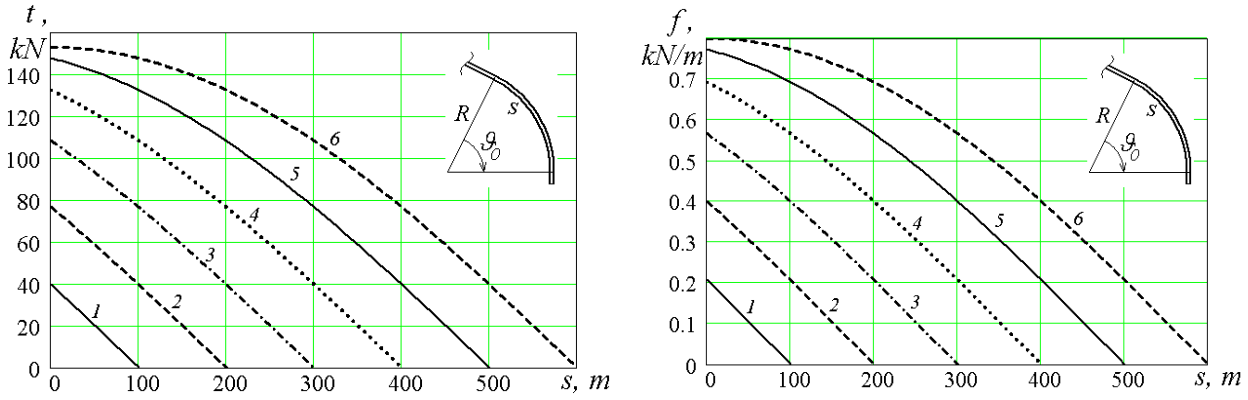
ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online



а) б)

$j\,EJ$ = 0,4 кН/м; R = 382 м; $k_t = 0$; $T_Z = 0$;
$1 - \vartheta_0 = 75°$; $2 - \vartheta_0 = 60°$; $3 - \vartheta_0 = 45°$; $4 - \vartheta_0 = 30°$; $5 - \vartheta_0 = 15°$; $6 - \vartheta_0 = 0°$

Рисунок 2 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони залежно від зенітного кута ϑ_0 на початку дугової ділянки свердловини при її переході у горизонтальну



а) б)

$j\,EJ$ = 0,4 кН/м; R = 382 м; $k_t = 0$; $T_Z = 0$;
$1 - \vartheta_0 = 15°$; $2 - \vartheta_0 = 30°$; $3 - \vartheta_0 = 45°$; $4 - \vartheta_0 = 60°$; $5 - \vartheta_0 = 75°$; $6 - \vartheta_0 = 90°$

Рисунок 3 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони залежно від зенітного кута ϑ_0 на початку дугової ділянки свердловини при її переході з похилої у вертикальну

Для горизонтальної свердловини $\vartheta = 90°$. З першого рівняння системи (5) реакція стінки $f = j$ і створює зовнішню силу тертя таку, що

$$\left|T_H\right| = k_t f L_H, \qquad (14)$$

де L_H – довжина горизонтальної частини колони. Сила тертя діє на горизонтальну колону при її просуванні до вибою і спрямована протилежно до напрямку руху.

Друге спрощене рівняння системи (5) та його інтеграл такі:

$$t' = k_t j, \quad t = k_t j s + c,$$

де s – координата перетину колони від початку горизонтальної ділянки.

Гранична умова – осьова сила відсутня на башмаку колони: $t = T_Z = 0$ при $s = L_H$, звідки:

$$t = -k_t j (L_H - s). \qquad (15)$$

Отже, внаслідок руху колони і тертя на горизонтальній ділянці у тілі труб виникає осьова стискальна сила ($t < 0$), яка у початковому перетині: $T_H = -k_t j L_H$. Як бачимо, ця внутрішня сила дорівнює зовнішній силі тертя, що діє на колону.

Таким чином силу T_H визначено як силу гальмування руху горизонтальної колони. Оскільки при цьому глибина незмінна, то для просування колони до неї потрібно прикладати осьову стискальну силу на усті свердловини, не меншу за $|T_H|$, величина якої буде зростати зі збільшенням довжини просування L_H.

Для похилої прямолінійної свердловини $\vartheta = const$; тоді розподілена реакція її стінок: $f = j \sin\vartheta$. Друге рівняння системи (5) спрощується до такого:

$$t' = -j\cos\vartheta + k_t j \sin\vartheta. \qquad (16)$$

Прямим інтегруванням знайдемо:

$$t = -j\cos\vartheta\cdot s + k_t j\sin\vartheta\cdot s + c =$$
$$= -j\,z + k_t j\,x + c,$$

де x – горизонтальна координата даного перетину стрижня відносно початкового (відстань по горизонталі від початку похилої ділянки свердловини до перерізу колони).

У даному випадку $x = z\cdot\mathrm{tg}\,\vartheta$, тоді:

$$t = -j\,(1 - k_t\mathrm{tg}\,\vartheta)\,z + c.$$

Гранична умова: до нижнього перетину ділянки колони прикладена осьова сила $t = T_Z$ при $z = Z$, звідки маємо:

$$T_Z = -j\,(1 - k_t\mathrm{tg}\,\vartheta)\,Z + c,$$
$$c = T_Z + j\,(1 - k_T\mathrm{tg}\,\vartheta)\,Z.$$

Отже, осьова сила на похилій ділянці:

$$t = j\,(Z - z)(1 - k_t\mathrm{tg}\,\vartheta) + T_Z. \qquad (17)$$

Як бачимо, внутрішня осьова сила розтягу стає меншою внаслідок сили тертя, яка залежить від коефіцієнта тертя та зенітного кута нахилу свердловини.

Для вертикальної ділянки ($\vartheta = 0$) останні формули співпадають з такими, що отримані без врахування тертя; тому вони теж не враховують тертя об стінки вертикальної свердловини центрувальних та інших пристроїв, якими обладнують обсадну колону.

Розглянемо похилу прямолінійну свердловину, близьку до горизонтальної: $60° < \vartheta < 90°$, та просування по ній нижньої частини колони з башмаком, на якому $T_Z = 0$. При цьому можливий випадок: $k_t\mathrm{tg}\,\vartheta = 1$. Тоді розтягувальна сила у тілі труби зникає, тому що проекція ваги на вісь колони зрівноважується силою тертя, яка діє у протилежному напрямку. Це може мати місце, наприклад, при співвідношеннях параметрів, які наведені у таблиці:

k_t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
ϑ	84°,3	78°,7	73°,3	68°,2	63°,4

Якщо зенітний кут колони менший за вказаний у таблиці, то сила гальмування не виникає, а для просування труб не потрібно прикладати до додаткову стискальну силу. Якщо ж зенітний кут пологої свердловини перевищує вказаний у таблиці кут для відповідного середнього коефіцієнта тертя на ділянці, то для просування колони труб довжиною L_H потрібно прикласти стискальну силу, не меншу за

$$T_H = -j\,L_H\cos\vartheta(k_t\mathrm{tg}\,\vartheta - 1) =$$
$$= -j\,L_H(k_t\sin\vartheta - \cos\vartheta). \qquad (18)$$

Для точного розрахунку сил гальмування колони труб на пологих і горизонтальних ділянках свердловини потрібно знати точні значення фізичних коефіцієнтів тертя.

Ділянка свердловини, вигнута за дугою кола, з врахуванням тертя

Розглянемо випадок, коли ділянку свердловини можна описати дугою кола постійного радіуса R з достатньою точністю. Такі ділянки можна виявити при чисельному диференціюванні інклінометричної таблиці $\vartheta(s)$.

У цьому випадку кривизна колони і згинальний момент $\vartheta' = q = R^{-1} = const$, поперечна сила $q' = -u = 0$, а основна система (5) спрощується до вигляду:

$$t\cdot R^{-1} = j\sin\vartheta - f,\ t' = -j\cos\vartheta + k_t f. \qquad (19)$$

З першого рівняння отримаємо вираз розподіленої реакції стінок свердловини:

$$f = j\sin\vartheta - t\cdot R^{-1}. \qquad (20)$$

Отже, задача визначення реакції f вимагає знаходження осьової сили t. Для цього виключимо функцію f з системи (19):

$$t' + k_t R^{-1}\cdot t = j\,(k_t\sin\vartheta - \cos\vartheta). \qquad (21)$$

Отримане диференціальне рівняння є лінійним неоднорідним першого порядку. Враховуючи, довжину дуги $s = R\,\vartheta$, розв'язок однорідного рівняння $t' + k_t R^{-1}\cdot t = 0$ знайдемо розділенням змінних:

$$\frac{t'}{t} = -\frac{k_t}{R} \ \Rightarrow\ t = C\,e^{-k_t\vartheta}. \qquad (22)$$

Невизначений коефіцієнт C для неоднорідного рівняння знайдемо методом Лагранжа:

$$t' = C'e^{-k_t\vartheta} - Ce^{-k_t\vartheta}k_t\vartheta' = C'e^{-k_t\vartheta} - k_t R^{-1}\cdot t;$$
$$t' + k_t R^{-1}\cdot t = C'e^{-k_t\vartheta} = j\,(k_t\sin\vartheta - \cos\vartheta);$$
$$C' = j\,e^{k_t\vartheta}(k_t\sin\vartheta - \cos\vartheta);$$
$$C = j\,k_t\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,ds - j\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,ds + c.$$

Знаючи диференціал $ds = R\,d\vartheta$, отримаємо:

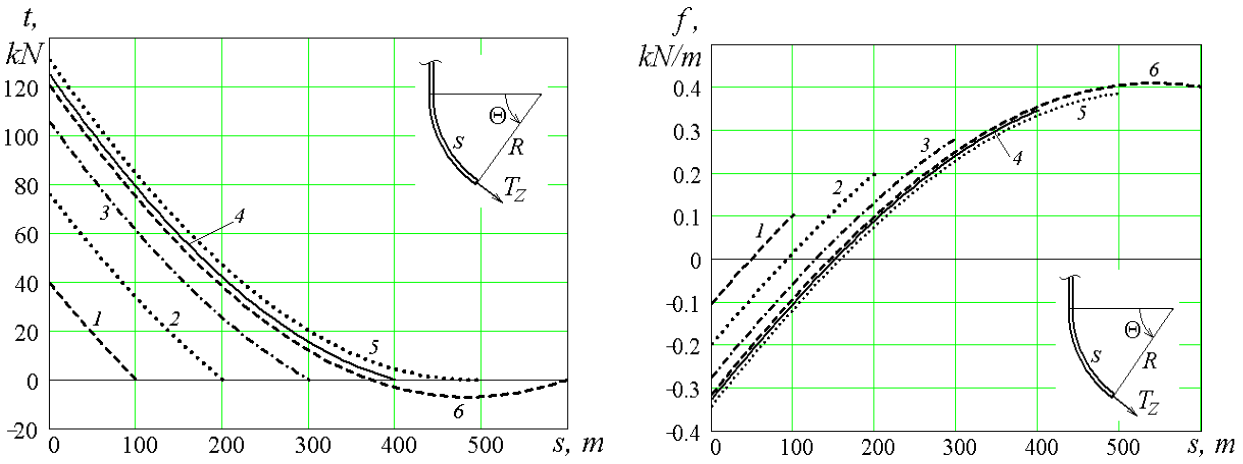
$$C = jR\left(k_t\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta - \right.$$
$$\left. - \int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta\right) + c. \qquad (23)$$

Ці інтеграли знайдемо, двічі застосувавши інтегрування частинами. Перший інтеграл (23):

$$\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta = -\int e^{k_t\vartheta}d(\cos\vartheta) =$$
$$= -e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta + \int\cos\vartheta\,d(e^{k_t\vartheta}) =$$
$$= -e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta + k_t\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta =$$
$$= -e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta + k_t\int e^{k_t\vartheta}\,d(\sin\vartheta) =$$
$$= -e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta + k_t\left(e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta - \int\sin\vartheta\,d(e^{k_t\vartheta})\right) =$$
$$= -e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta + k_t e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta - k_t^2\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta.$$

Звідси

$$(1 + k_t^2)\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta = k_t e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta - e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta,$$



а) б)

k_t = 0,3; $j\,EJ$ = 0,4 кН/м; R = 382 м; T_Z = 0;
1 – Θ = 15°; *2* – Θ = 30°; *3* – Θ = 45°; *4* – Θ = 60°; *5* – Θ = 75°; *6* – Θ = 90°

Рисунок 4 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони при дії тертя залежно від зенітного кута Θ у кінці дугової ділянки свердловини

$$\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta = \frac{e^{k_t\vartheta}}{1+k_t^2}(k_t\sin\vartheta-\cos\vartheta). \quad (24)$$

Другий інтеграл (23):

$$\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta = \int e^{k_t\vartheta}d(\sin\vartheta) =$$
$$= e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta - \int\sin\vartheta\,d(e^{k_t\vartheta}) =$$
$$= e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta - k_t\int e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta\,d\vartheta =$$
$$= e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta + k_t\int e^{k_t\vartheta}d(\cos\vartheta) =$$
$$= e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta + k_t\left(e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta - \int\cos\vartheta\,d(e^{k_t\vartheta})\right) =$$
$$= e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta + k_t e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta - k_t^2\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta.$$

Звідси

$$(1+k_t^2)\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta = e^{k_t\vartheta}\sin\vartheta + k_t e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta,$$

$$\int e^{k_t\vartheta}\cos\vartheta\,d\vartheta = \frac{e^{k_t\vartheta}}{1+k_t^2}(\sin\vartheta+k_t\cos\vartheta). \quad (25)$$

Таким чином визначено коефіцієнт C:

$$C = \frac{jRe^{k_t\vartheta}}{1+k_t^2}\left(k_t(k_t\sin\vartheta-\cos\vartheta) - (\sin\vartheta+k_t\cos\vartheta)\right)+c = \quad (26)$$
$$= -\frac{jRe^{k_t\vartheta}}{1+k_t^2}\left((1-k_t^2)\sin\vartheta+2k_t\cos\vartheta\right)+c.$$

Загальний розв'язок неоднорідного рівняння (21):

$$t = c\cdot e^{-k_t\vartheta} - \frac{jR}{1+k_t^2}\left((1-k_t^2)\sin\vartheta+2k_t\cos\vartheta\right). \quad (27)$$

Гранична умова: до нижнього кінця ділянки колони прикладена осьова сила $t = T_Z$ при $z = Z$ і $\vartheta = \Theta$, звідки маємо:

$$T_Z = ce^{-k_t\Theta} - \frac{jR}{1+k_t^2}\left((1-k_t^2)\sin\Theta+2k_t\cos\Theta\right),$$

$$c = \frac{jRe^{k_t\Theta}}{1+k_t^2}\left((1-k_t^2)\sin\Theta+2k_t\cos\Theta\right)+T_Z e^{k_t\Theta}.$$

Отже, на вигнутій за дугою кола ділянці осьова сила з врахуванням тертя така:

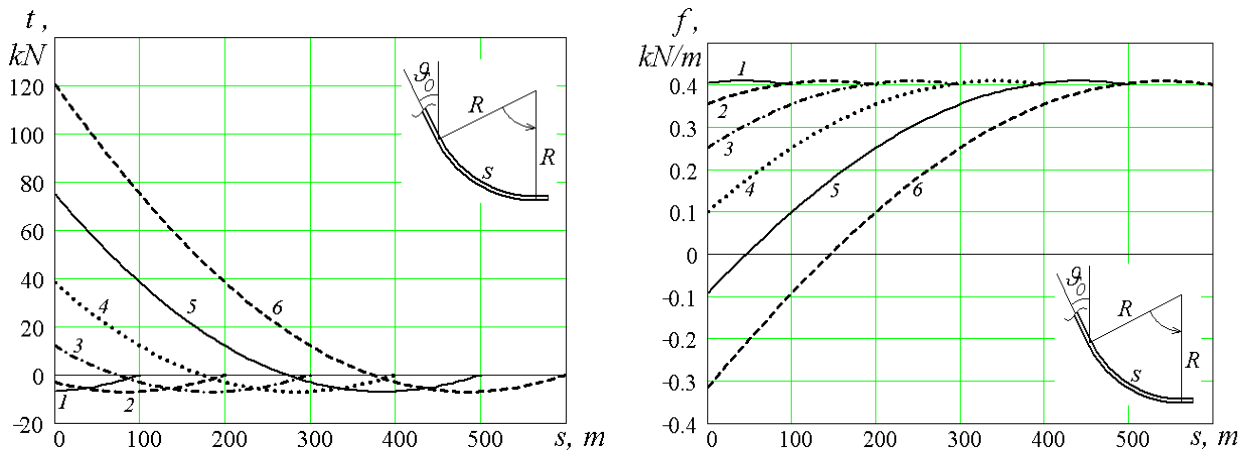
$$t = \frac{jR}{1+k_t^2}\left((1-k_t^2)(e^{k_t(\Theta-\vartheta)}\sin\Theta-\sin\vartheta)+\right.$$
$$\left.+2k_t(e^{k_t(\Theta-\vartheta)}\cos\Theta-\cos\vartheta)\right)+T_Z e^{k_t(\Theta-\vartheta)};$$
$$t = \frac{jR}{1+k_t^2}\left(e^{k_t(\Theta-\vartheta)}\left((1-k_t^2)\sin\Theta+2k_t\cos\Theta\right)-\right.$$
$$\left.-((1-k_t^2)\sin\vartheta+2k_t\cos\vartheta)\right)+T_Z e^{k_t(\Theta-\vartheta)}. \quad (28)$$

Тоді за рівнянням (20) реакція стінок свердловини з врахуванням тертя така:

$$f = \frac{j}{1+k_t^2}\left(2(\sin\vartheta+k_t\cos\vartheta)-\right.$$
$$\left.-e^{k_t(\Theta-\vartheta)}((1-k_t^2)\sin\Theta+2k_t\cos\Theta)\right)- \quad (29)$$
$$-\frac{T_Z}{R}e^{k_t(\Theta-\vartheta)}.$$

Характер розподілу осьової сили і реакції стінок показано на рис. 4 залежно від довжини колони на дуговій ділянці переходу від вертикальної до похилої свердловини, на якій зенітний кут зростає у межах $0<\vartheta<\Theta$. Внаслідок тертя збільшується нелінійність розподілу осьової сили, а її величина зменшується; особливо це виявляється при більших значеннях зенітного кута.

На дуговій ділянці ближче до горизонтальної свердловини тертя спричинює у колоні труб внутрішню стискальну силу (на довжині 230 м – рис. 4*а*, лінія *6*; координата нейтрального пе-



а) б)

$k_t = 0{,}3$; $jEJ = 0{,}4$ кН/м; $R = 382$ м; $T_Z = 0$;
$1 - \vartheta_0 = 75°$; $2 - \vartheta_0 = 60°$; $3 - \vartheta_0 = 45°$; $4 - \vartheta_0 = 30°$; $5 - \vartheta_0 = 15°$; $6 - \vartheta_0 = 0°$

Рисунок 5 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони під дією тертя залежно від зенітного кута ϑ_0 на початку дугової ділянки свердловини при її переході у горизонтальну

ретину 370 м). Нелінійність і величина реакції стінок теж зростають; на ближчій до горизонтальної ділянці (довжиною 120 м – рис. 4*б*, лінія *6*) вона навіть дещо перевищує вагу колони.

При переході по дузі кола від похилої свердловини до горизонтальної, для якої $\Theta = 90°$, зенітний кут зростає у межах $\vartheta_0 < \vartheta < 90°$, де ϑ_0 – його значення на початку дугової ділянки, а осьова сила і реакції стінок виражаються так:

$$t = \frac{jR}{1+k_t^2}\Big((1-k_t^2)(e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)} - \sin\vartheta) - 2k_t\cos\vartheta\Big) + T_Z e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)}, \quad (30)$$

$$f = \frac{j}{1+k_t^2}\Big(2\sin\vartheta + 2k_t\cos\vartheta - (1-k_t^2)\,e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)}\Big) - \frac{T_Z}{R}e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)}. \quad (31)$$

На рис. 5 показано характер розподілу цих чинників у залежності від довжини дугової ділянки при переході від похилої до горизонтальної свердловини. Внаслідок тертя осьова сила значно зменшується, а на пологій ділянці, ближче до горизонтальної, відбувається стискання труби (на довжині 230 м, $56° \le \vartheta \le 90°$ – рис. 5*а*). Величина реакції стінок теж зростає у додатному напрямку; на ближчій до горизонтальної ділянці (довжиною 120 м – рис. 5*б*) во-
На ділянці переходу по дузі кола від похилої свердловини до вертикальної ділянки привибійної зони зенітний кут колони спадає від ϑ_0 до $\Theta = 0$, тому $\vartheta' < 0$, а $ds = -R\,d\vartheta$, у результаті чого розв'язок основної системи рівнянь (19) такий:

$$t = \frac{jR}{1+k_t^2}\Big((1-k_t^2)\sin\vartheta + 2k_t(\cos\vartheta - e^{-k_t\vartheta})\Big) + T_Z e^{-k_t\vartheta}, \quad (32)$$

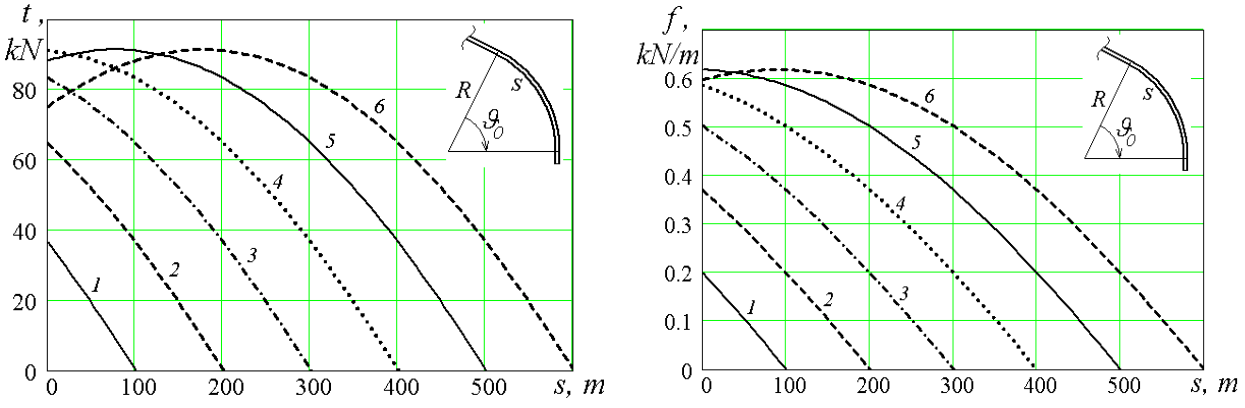
$$f = \frac{2j}{1+k_t^2}\Big(\sin\vartheta + k_t\cos\vartheta - k_t e^{-k_t\vartheta}\Big) + \frac{T_Z}{Re^{k_t\vartheta}}. \quad (33)$$

На рис. 6 показано характер розподілу цих чинників у залежності від довжини дугової ділянки при переході від похилої до вертикальної свердловини. Внаслідок тертя осьова сила розтягу стає значно меншою. На початку переходу від пологої ділянки (з великим зенітним кутом) до вертикальної ($\Theta = 0$) осьова сила розтягу є меншою через велику силу тертя; далі зі зменшенням зенітного кута сила тертя зменшується, а сила розтягу зростає (рис. 6*а*, лінії *5* і *6*). На цій же ділянці реакція стінок стає меншою внаслідок тертя.

Визначення нейтрального перетину обсадної колони у похилій і горизонтальній свердловині

Одержані результати дають змогу визначити положення нейтрального перетину обсадної колони, у якому осьова сила розтягу переходить у стискальну силу, створену тертям колони об стінки свердловини.

Спочатку розглянемо випадок, коли обсадна колона опущена з похилої ділянки у вигнуту за дугою кола, а башмак колони дійшов до початку горизонтальної свердловини: $T_Z = 0$. Як показує рис. 5*а*, нижня частина такої колони знаходиться у стисненому стані, а у нейтраль-



а) б)

k_t = 0,3; $j\,EJ$ = 0,4 кН/м; R = 382 м; T_Z = 0;
$1-\vartheta_0=15°$; $2-\vartheta_0=30°$; $3-\vartheta_0=45°$; $4-\vartheta_0=60°$; $5-\vartheta_0=75°$; $6-\vartheta_0=90°$

Рисунок 6 – Розподіл осьової сили (*а*) і реакції стінок (*б*) по довжині колони під дією тертя залежно від зенітного кута ϑ_0 на початку дугової ділянки свердловини при її переході з похилої у вертикальну

ному перетині $t=0$, тоді за формулою (28) маємо рівняння

$$(1-k_t^2)(e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}-\sin\vartheta)-2k_t\cos\vartheta=0\,. \quad (34)$$

Це параметричне трансцендентне рівняння залежить лише від коефіцієнта тертя k_t та, на що слід звернути особливу увагу, не залежить ні від питомої ваги колони, ні від радіуса її кривизни. Його розв'язання, виконане у системі Mathcad графічно і за функцією *root*, дало такі результати:

k_t	0,1	0.2	0,3	0,4	0,5
ϑ	78°,5	67°,1	55°,6	43°,9	31°,9

Цей розв'язок вказує зенітний кут, починаючи з якого буде стисненою обсадна колона, що через дугову ділянку починає входити у горизонтальну свердловину, в залежності від коефіцієнта тертя на ділянці. Отже, чим більший коефіцієнт тертя, тим вище по колоні і з меншого зенітного кута починається осьовий стиск колони у викривленій свердловині.

Тепер розглянемо випадок, коли у горизонтальній свердловині вже знаходиться частина колони довжиною L_H, просунута з дугової ділянки. Вона створює у перерізі, що з'єднує дугову і лінійну ділянки колони, стискальну силу $T_Z=-k_t\,j\,L_H$ згідно з (15). Тоді за формулою (28) отримаємо таке трансцендентне рівняння

$$(1-k_t^2)(e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}-\sin\vartheta)-2k_t\cos\vartheta-$$
$$-k_t(1+k_t^2)\frac{L_H}{R}e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}=0,$$
$$e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}-\sin\vartheta-\frac{2k_t}{1-k_t^2}\cos\vartheta-$$
$$-k_t\frac{1+k_t^2}{1-k_t^2}\frac{L_H}{R}e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}=0,$$
$$\left(1-k_t\frac{1+k_t^2}{1-k_t^2}\frac{L_H}{R}\right)e^{k_t(0,5\pi-\vartheta)}-$$
$$-\sin\vartheta-\frac{2k_t}{1-k_t^2}\cos\vartheta=0\,. \quad (35)$$

У цьому випадку параметричне рівняння залежить від коефіцієнта тертя k_t, від радіуса кривизни R дугової ділянки і довжини L_H колони, просунутої у горизонтальну свердловину, але не залежить від питомої ваги колони. Його розв'язання, наприклад, при $R=382$ м, $k_t=0,3$ дало таку залежність зенітного кута ϑ нейтрального перетину від довжини L_H:

L_H, м	0	100	200	300	400	500	625
ϑ	55°,6	42°,5	32°,8	24°,3	16°,5	9°,1	0°

Цей розв'язок вказує зенітний кут ϑ, починаючи з якого у дуговій ділянці буде стисненою обсадна колона, просунута у горизонтальну свердловину, в залежності від її довжини L_H. Як бачимо, просування колони у горизонтальну свердловину приводить до переміщення уверх по колоні нейтрального перетину (зменшення його зенітного кута) та збільшення стисненої нижньої частини колони у викривленій свердловині.

Це пояснюється зростанням сили гальмування колони при збільшенні її довжини у горизонтальній свердловині. Зрозуміло, що сили гальмування просуванню колони можуть зрости настільки, що нейтральний перетин може піднятись до рівня стола бурильної установки. При цьому уся колона обсадних труб буде стисненою, і для її подальшого просування необхідно на усті свердловини прикладати додаткову осьову силу, більшу за вагу приєднуваної обсадної труби.

Розв'язанням рівняння (35) також отримано залежність зенітного кута ϑ нейтрального

перетину від радіуса кривизни R дугової ділянки, з якої колона просунута у горизонтальну свердловину на довжину, наприклад, $L_H = 400$ м при $k_t = 0{,}3$:

R, м	244	382	500	650	900	1200
ϑ	0°	16°,5	23°,9	29°,7	35°,5	39°,6

Цей розв'язок вказує зенітний кут ϑ, починаючи з якого на дуговій ділянці буде стисненою обсадна колона, просунута у горизонтальну свердловину, залежно від радіуса кривизни R. Як бачимо, зменшення радіуса кривизни дугової ділянки приводить до переміщення угору по колоні нейтрального перетину (зменшення його зенітного кута) та збільшення стисненої нижньої частини колони у викривленій свердловині. Це можна пояснити тим, що зростає реакція стінок і сила тертя на самій дуговій ділянці. При намаганні опустити колону у горизонтальну свердловину через дугову ділянку малого радіуса (великої кривизни) нейтральний перетин може перемістись у вертикальну ділянку колони, так що уся її нижня частина, включаючи похилу, дугову і горизонтальну, буде стиснена.

Отже, чим довшою запроектовано горизонтальну ділянку свердловини, тим більший радіус (меншу кривизну) повинна мати перехідна до неї дугова ділянка. Співвідношення між радіусом R дугової і довжиною L_H горизонтальної ділянок можна знайти за рівнянням (35).

Розглянемо проект свердловини, за яким її вертикальний стовбур через дугову ділянку переходить у горизонтальну. Спочатку поставимо умову, щоб нейтральний перетин знаходився на початку дугової ділянки, а вертикальна колона була розтягнута: $\vartheta = 0°$. За рівнянням (35) отримаємо

$$\left(1 - k_t \frac{1+k_t^2}{1-k_t^2}\frac{L_H}{R}\right) e^{0{,}5\pi k_t} - \frac{2k_t}{1-k_t^2} = 0,$$

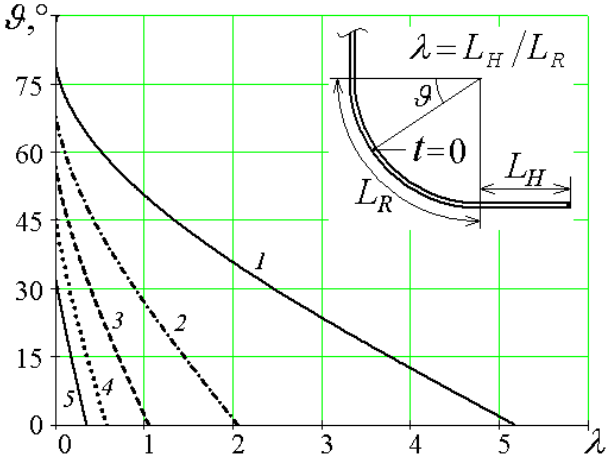
$$R\left((1-k_t^2) - \frac{2k_t}{e^{0{,}5\pi k_t}}\right) = k_t(1+k_t^2)L_H. \quad (36)$$

Співвідношення між R та L_H є лінійним при постійному k_t і $\vartheta = 0°$; при $k_t = 0{,}3$ за попередньою таблицею $L_H / R = 400/244$.

Тепер для тієї ж проектної свердловини розглянемо залежність зенітного кута ϑ, який визначає положення нейтрального перетину, від співвідношення $\lambda = L_H / L_R$, де $L_R = 0{,}5\pi R$ – довжина колони труб у радіусній ділянці свердловини, яка утворює чверть кола. За рівнянням (35) отримаємо таку неявно задану функцію $F(\vartheta, \lambda) = 0$:

$$(1-k_t^2)(e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)} - \sin\vartheta) - 2k_t\cos\vartheta -$$
$$- k_t(1+k_t^2)e^{k_t(0{,}5\pi-\vartheta)} \cdot 0{,}5\pi\lambda = 0. \quad (37)$$

Її графіки представлено на рис. 7 для різних значень коефіцієнта тертя. Співвідношення $\lambda = L_H / L_R$ показує, у скільки разів довжина горизонтальної труби може бути більшою (чи меншою) за довжину труби на дуговій ділянці; а за графіком на рис. 7 можна визначити, де при цьому на дузі знаходиться нейтральний перетин – його зенітний кут. Так, наприклад, якщо при $k_t = 0{,}2$ довжини труб на горизонтальній і на радіусній ділянках будуть однаковими ($\lambda = 1$), то нейтральним буде перетин труби із зенітним кутом 26°,8 (лінія *2*). Якщо ж довжина горизонтальної труби перевищить довжину дуги у 2 рази, то нейтральний перетин переміститься на початок дугової (у кінець вертикальної ділянки), а вся радіусна ділянка буде стисненою. Подальше просування колони у горизонтальну свердловину приведе до того, що сила гальмування горизонтальної ділянки колони буде зростати, а нейтральний перетин буде підійматись по вертикальній частині колони до устя свердловини.



1 – $k_t = 0{,}1$; *2* – $k_t = 0{,}2$; *3* – $k_t = 0{,}3$; *4* – $k_t = 0{,}4$; *5* – $k_t = 0{,}5$

Рисунок 7 – Залежність зенітного кута ϑ нейтрального перетину (його положення на дузі) обсадної колони від співвідношення довжин її горизонтальної і дугової ділянок

Остаточні розрахунки стиснених і розтягнених частин непрямолінійної обсадної колони можна провести для конкретної конфігурації проектної чи пробуреної свердловини, використовуючи знайдені тут розв'язки для прямолінійних ділянок (вертикальної, похилої, горизонтальної) та вигнутих за дугою кола.

Висновки

Колона обсадних труб у непрямолінійній свердловині працює як довгий пружний стрижень, зігнений внаслідок реакції її стінок. Для поширеного випадку розташування ділянок колони в одній площині система диференціальних рівнянь, яка описує її напружено-деформований стан, зведена до чотирьох рівнянь. Розв'язок цієї системи у припущенні відсутності сил тертя дозволив у першому наближенні встановити нелінійний характер розподілу осьових сил розтягу і реакцій стінок свердловини вздовж колони на викривлених ділянках.

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

Врахування сил тертя, які діють при опусканні колони труб у невертикальну свердловину, дало змогу знайти вирази стискальних осьових сил на горизонтальних, похилих і близьких до горизонтальних ділянках. Задача руху колони на ділянках свердловини, викривлених за дугою кола постійного радіуса, зведена до неоднорідного лінійного диференціального рівняння першого порядку відносно осьової сили. Його розв'язок дозволив з'ясувати особливості повздовжнього розподілу осьових сил і реакцій стінок свердловини на ділянках зростання і спадання зенітного кута.

Отримані результати дають змогу визначити положення нейтрального перетину та довжину стисненої нижньої частини обсадної колони при різних конфігураціях свердловини: на її прямолінійних (похилих, горизонтальних) і викривлених за дугою кола ділянках та при різних їх поєднаннях.

Література

1 Гулизаде М. П. Определение угла скручивания труб в пространственно искривленной скважине / М. П. Гулизаде, Л. Я. Сушон, Г. М. Зельманович // Известия ВУЗов: Нефть и газ. – 1968. – № 4. – С. 19-23.

2 Александров М. М. Силы сопротивления при движении труб в скважине / М.М. Александров – М.: Недра, 1978. – 209 с.

3 Гуляєв В.И. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней / В.И. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, В.Л. Кошкин. - К.: Наукова думка, 1992. - 342 с.

4 Палійчук І.І. Метод визначення внутрішніх силових чинників у обсадній колоні глибокої, просторово орієнтованої свердловини / І.І. Палійчук // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 2 (63) – С. 44-50.

Стаття надійшла до редакційної колегії
12.03.18
Рекомендована до друку
професором ***Лисканичем М.В.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук ***Ставичним Є.М.***
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)