

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ДИАГНОСТИКИ

PACS numbers: 02.60.Cb, 45.20.-d, 46.70.-p, 62.20.Qr, 62.25.-g, 81.40.Pq, 81.70.Bt

### Діагностування прихоплень металевих бурильних труб за їхнім напружено-деформованим станом у похило-скерованій свердловині

К. Г. Левчук<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup>*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

<sup>\*\*</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15,  
76019 Івано-Франківськ, Україна*

У статті розглянуто задачу математичного моделювання динаміки вивільнення дискретно-континуальної системи металевих бурильних труб, прихоплених у похило-скерованій свердловині. Створено комп'ютерну програму для чисельного розрахунку характеристик напружено-деформованої прихопленої металевої бурильної колони, що відповідають випадку ліквідації аварії. Розроблено методику діагностування стану металевих труб, що уможливило обґрунтовано вибрати спосіб ліквідації прихоплень бурильного інструменту. На прикладі прихопленої металевої бурильної труби у глибокій криволінійній свердловині з урахуванням чинників її неоднорідного навантаження зовнішніми зосередженими силами, а також розподіленими силами тяжіння, контактної та фрикційної взаємодій зі стінками свердловини проведено чисельні розрахунки й одержано залежності міцності від техніко-технологічних чинників її вивільнення.

Corresponding author: Kateryna Grygorivna Levchuk  
E-mail: kgl.imp.nan@gmail.com

<sup>\*</sup>*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

<sup>\*\*</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: K. G. Levchuk, Diagnosing of a Freeze-In of Metal Drill Pipes by Their Stressedly-Deformed State in the Controlled Directional Bore Hole, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 5: 701–712 (2018) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.40.05.0701.

**Ключові слова:** похило-скерована свердловина, металева бурильна колона, прихоплення, діагностування, міцність.

The article considers the problem of a mathematical modelling of the dynamics for the release of discrete-continuous system of metal drill pipes frozen in a directional well. A computer program is created for the numerical calculation of the characteristics of stressedly deformed stuck metal drill string, which arise during the elimination of an accident. A technique for diagnosing the state of metal pipes is developed and makes it possible to justify the choice of a method for eliminating the stuck drilling tool. By the example of a stuck metal drill pipe in a deep controlled directional well, taking into account the agents of its heterogeneous load by external concentrated forces as well as the distributed gravity forces, contact and frictional interactions with walls of the well, a numerical calculation is performed, and the strength dependences on the technical and technological factors of its unfreezing are obtained.

**Key words:** directional well, metal drill string, stuck, diagnosis, strength.

В статье рассмотрена задача математического моделирования динамики освобождения дискретно-континуальной системы металлических бурильных труб, прихваченных в наклонно-направленной скважине. Создана компьютерная программа для численного расчёта характеристик, отвечающих случаю ликвидации аварии, напряжённо-деформированной прихваченной металлической бурильной колонны. Разработана методика диагностики состояния металлических труб, позволяющая обосновано выбирать способ ликвидации прихватов бурильного инструмента. На примере прихваченной металлической бурильной трубы в глубокой криволинейной скважине с учётом факторов её неоднородной нагрузки внешними сосредоточенными силами, а также распределёнными силами тяжести, контактного и фрикционного взаимодействий со стенками скважины проведён численный расчёт и получены зависимости прочности от технико-технологических факторов её освобождения.

**Ключевые слова:** наклонно-направленная скважина, металлическая бурильная колона, прихват, диагностика, прочность.

*(Отримано 21 лютого 2018 р.)*

## 1. ВСТУП

Швидкий розвиток розвідки нафтових і газових свердловин у складних географічних і кліматичних умовах є неможливим без розбурювання нафтових родовищ похило-скерованих свердловин і удосконалених технологій. Нині об'єм криволинійного буріння складає понад 95% від загальної кількості прокладених свердловин. Розбурювання родовищ потребує принципово нових технічних рішень у нафтопромисловому будівництві. Водночас виникла низка техніко-технологічних й економічних проблем, пов'язаних з перетином

стовбурів пробурених і проєктних свердловин, прихоплень металевих бурильного інструменту, зниження експлуатаційної надійності обладнання.

Похило-спрямоване буріння використовують для буріння свердловин на нафту і газ та з метою розвідки вуглеводів. Найефективнішим таке буріння є у випадках розробки родовищ в акваторіях морів й океанів, у болотистих місцевостях або при будівництві допоміжних свердловин для заглушення відкритих фонтанів. Необхідність буріння таких свердловин визначається особливістю рельєфу поверхні, прагненням понизити витрати та час на будівництво споруд, розкриття пластів, що глибоко залягають [1–3].

Сучасний розвиток техніки та технології буріння уможливило прокладати нафтові та газові свердловини з різною конфігурацією й орієнтацією стовбура. Оскільки це уможливило шляхом вибору заданого викривлення свердловини істотно збільшувати ефективність видобутку палива, буріння похило-скерованих свердловин переважає в більшості країн світу. Аварії на криволінійних свердловинах достатньо складні технічно та технологічно. Процес їх ліквідації погіршується у випадку наявності значної кількості горизонтів, яких сформовано нестійкими гірськими породами, або відносно великих глибин залягання цих продуктивних горизонтів. Велика глибина залягання ускладнює ситуацію зі стійкістю стінок похилих ділянок стовбура свердловини, що є причиною виникнення прихоплень і стримує розвиток горизонтального буріння [4].

Прихоплення металевих бурильних труб при спусканні їх у свердловину трапляються у випадку виникнення осипань і обвалів гірських порід, прилипань металевих бурильної колони (МБК) до кірки свердловини, заклинювань у жолобах, місцях викривлень стовбура свердловини, попадань сторонніх предметів. Успіх ліквідації прихоплень бурильного інструменту в похило-скерованій свердловині, насамперед, залежить від вибору ефективного способу вивільнення МБК, що забезпечується величиною і характером зміни збурювальних сил, та одночасного збереження її міцності. Одним із основних чинників, що визначає стійкість, експлуатаційну надійність і міцність МБК, є напружено-деформаційний стан.

Пошук ефективних способів вивільнення прихоплених МБК потребує аналізу статичних і динамічних розв'язків системи неоднорідних нелінійних диференціальних рівнянь, визначення на їх основі збурювальних сил, які забезпечать ліквідацію аварії, та деформовано-напруженого стану металу, з якого виготовлено труби. Тому на етапах проєктування та спорудження таких свердловин основну увагу необхідно звернути на реалізацію у комп'ютерних розрахунках методів математичного моделювання.

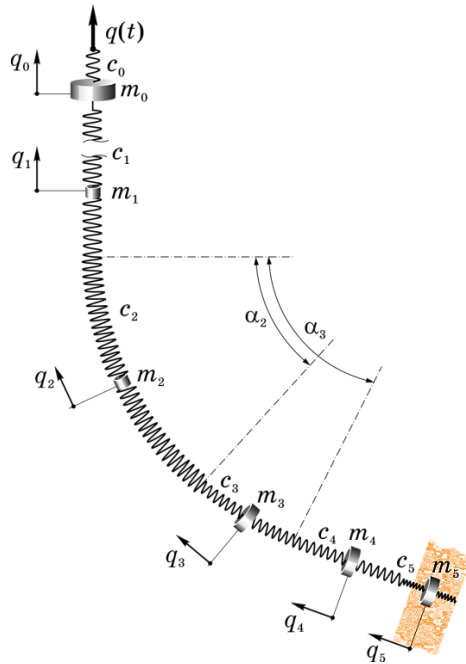
Мета роботи — створення науково обґрунтованої методи діагностування технічного стану металевих труб для вибору способу лікві-

дації прихоплення і прогнозування їхньої міцності та довговічності у похило-скерованих свердловинах.

## 2. МАТЕМАТИЧНИЙ МОДЕЛЬ ВИВІЛЬНЕННЯ ПРИХОПЛЕНОЇ МЕТАЛЕВОЇ ТРУБИ

Розглянемо прихоплення обважненої металевої труби у похило-скерованій свердловині, профіль якої містить три інтервали: вертикальну ділянку, ділянку зі збільшенням zenітних кутів  $\alpha_2$  і  $\alpha_3$ , а також тангенційну (ділянку стабілізації zenітного кута). Прокладання таких свердловин із застосуванням відхильників уможливають при найменшому zenітному куті свердловини одержати порівняно великий відхил від вертикалі та скоротити тривалість буріння. Зазначені профілі рекомендують застосовувати у тих випадках, коли потрібно забезпечити експлуатаційну надійність елементів, що центрують компоновку низу бурильної колони (рис. 1).

Вибір компоновки МБК залежить від кількості інтервалів викривленої свердловини у заданих умовах, геометричних параметрів тра-



**Рис. 1.** Розрахунковий дискретно-континуальний ступінчастий модель металевої бурильної колони у похило-скерованій свердловині.

**Fig. 1.** Calculated discrete-continuous stepped model of a metal drill string in a directional borehole.

екторії, діаметрів і довжини секцій із металевих і обважнених бурильних труб.

Металеву бурильну колону будемо розглядати як дискретно-континуальну шестимасову динамічну систему, яка містить п'ять секцій пружних металевих труб (табл. 1). Кожну секцію ( $i = 1, \dots, 5$ ) подамо у вигляді зосередженої маси  $m_i = \rho F_i l_i$  і пружнього елемента із жорсткістю  $c_i = EF_i/l_i$ , де  $\rho$  і  $E$  — густина і модуль пружності металу, з якого виготовлено бурильні труби;  $F_i$  і  $l_i$  — площа поперечного перерізу та довжина металевих бурильних труб. Переміщення зосереджених мас подамо дуговими координатами:  $q_0 = s_0$ ,  $q_1 = s_1$ ,  $q_2 = \varphi_2 R$ ,  $q_3 = \varphi_3 R$ ,  $q_4 = s_4$ ,  $q_5 = s_5$  ( $R$  — радіус кривини викривлених ділянок,  $\varphi_2$  і  $\varphi_3$  — кути, що вказують поточне положення на криволінійній ділянці свердловини відносно зосереджених мас  $m_i$  у положенні статичної рівноваги).

Зусилля, що уможливить вивільнити МБК, збурюють через пружний елемент ( $c_0$  — жорсткість талевої системи,  $m_0$  — зведена маса талевої системи), один кінець якого приєднано до колони, а другий переміщується разом з її вільною частиною вгору за законом  $q(t)$  [5].

Для запису динаміки вивільнення прихопленої МБК відносно положення статичної рівноваги скористаємося диференціальними рівняннями Ньютона–Ойлера:

$$\begin{aligned}
 m_0 \ddot{q}_0 &= -c_0(q_0 - q(t)) + c_1(q_1 - q_0), \quad m_1 \ddot{q}_1 = -c_1(q_1 - q_0) + c_2(q_2 - q_1) - \beta_1 \dot{q}_1, \\
 m_2 \ddot{\varphi}_2 R &= -c_2(\varphi_2 R - q_1) \cos(\alpha_2/4 - \varphi_2/2 - \theta_2) + c_3(\varphi_3 - \varphi_2) R \times \\
 &\times \cos(\alpha_3/4 + (\varphi_2 - \varphi_3)/2) + m_2 g [\cos(\alpha_2/2) - \cos(\alpha_2/2 - \varphi_2) + \\
 &+ \mu \sin(\alpha_2/2)] - F_{2\text{тр}} - \beta_2 \dot{\varphi}_2 R, \\
 m_3 \ddot{\varphi}_3 R &= -c_3(\varphi_3 - \varphi_2) R \cos(\alpha_3/4 + (\varphi_2 - \varphi_3)/2) + c_4(q_4 - \varphi_3 R) \times \\
 &\times \cos(\alpha_3/4 + \varphi_3/2 + \theta_3) + m_3 g [\cos(\alpha_3/2) - \cos(\alpha_3/2 - \varphi_3) + \\
 &+ \mu \sin(\alpha_3/2)] - F_{3\text{тр}} - \beta_3 \dot{\varphi}_3 R, \\
 m_4 \ddot{q}_4 &= -c_4(q_4 - \varphi_3 R) \cos(\alpha_3/4 + \varphi_3/2 + \theta_3) + c_5(q_5 - q_4) - \beta_4 \dot{q}_4 - F_{4\text{тр}}, \\
 m_5 \ddot{q}_5 &= -c_5(q_5 - q_4) - \beta_5 \dot{q}_5 - F_{5\text{тр}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

**ТАБЛИЦЯ 1.** Геометричні параметри секцій металеві бурильної колони у похило-скерованій свердловині.

**TABLE 1.** The geometric parameters of sections of the metal drill string within the directional well.

Номер секції	1	2	3	4	5
Довжина, м	1180	70	220	40	20
Зенітний кут, град	0	0–46	46–60	60	60

де  $\alpha_{3-} = \alpha_3 - \alpha_2$ ,  $\alpha_{3+} = \alpha_3 + \alpha_2$ ,  $\beta_i$  — коефіцієнт в'язкого опору бурового розчину, який залежить від його властивостей і геометричної форми металевої труби,  $F_{\text{тр}}$  — сила тертя.

Природа виникнення прихоплень є різною; тому і способи ліквідації їх відрізняються один від одного та мають свої особливості. На виникнення прихоплень МБК чинять вплив різноманітні чинники, розрізняти оцінювання яких важко. Схематично можна розділити сили, що утримують прихоплені металеві бурильні труби, на сили механічного притискання труб до стінок свердловини, пов'язані з дією перепаду тиску й осьюовою складовою ваги колони труб, та адгезійні сили взаємодії, що залежать від властивостей фільтраційної кірки, стану зони контакту й умов середовища.

Отже, стінки металевих бурильних труб у похило-скерованій свердловині зазнають додаткових стискальних контактних розподілених навантажень, зумовлених їх взаємодією із кіркою свердловини, і перебувають під дією фрикційних сил, викликаних тиском бурового розчину, що циркулює всередині та ззовні труб. Зазначимо, що при бурінні викривлених свердловин необхідно враховувати ефект Стрібека, оскільки контакт між МБК і свердловиною відбувається через змащення буровим розчином. Це приводить до зниження сили тертя при ковзанні залежно від міри взаємодії контактних поверхонь і наявності змащувальної плівки. Сили тертя Стрібека [6] спрямовані протилежно швидкості руху та зумовлені боковим тиском зовнішніх сил і сил прихоплення, що діють на металеві труби:

$$F_{\text{тр}} = \frac{2}{\pi} \mu \frac{\text{arctg}(\varepsilon \dot{q}_i)}{1 + \gamma |\dot{q}_i|} N_i \text{sign}(\dot{q}_i), \quad (2)$$

де  $\mu$  — динамічний коефіцієнт тертя,  $\varepsilon = 10^6$  — коригувальний параметер, що контролює форму відхилу динамічного тертя від статичного,  $\gamma$  — константа, що враховує змащувальний ефект у коефіцієнті динамічного тертя,  $N_i$  — радіальний тиск на стінки металевих труб.

На криволінійних ділянках радіальні тиски є змінними величинами, що залежать від положення труб на свердловині та швидкості їхнього руху (рис. 2). Тому до системи диференціальних рівнянь (1) необхідно додати вирази:

$$\begin{aligned} N_2 &= m_2 \left[ g \sin(\alpha_2/2 - q_2/R) + \dot{q}_2^2/R \right] + c_2(q_1 - q_2) \sin(\alpha_2/4 - \\ &- q_2/(2R) - \theta_2) - c_3(q_2 - q_3) \sin(\alpha_3/4 + (q_2 - q_3)/(2R)) , \\ N_3 &= m_3 \left[ g \sin(\alpha_{3+}/2 - q_3/R) + \dot{q}_3^2/R \right] + \left[ c_3 q_2 - q_3 \sin(\alpha_3/4 + \right. \\ &\left. + (q_2 - q_3)/(2R)) - c_4 q_3 - q_4 \sin(\alpha_{3-}/4 + q_3/(2R) + \theta_3) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

де кути  $\theta_2$  і  $\theta_3$  визначаємо з рівностей:

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \theta_2 &= \operatorname{ctg} (\alpha_2/4 - q_2/(2R)) + 4R/(l_1 - 2q_1), \\ \operatorname{ctg} \theta_3 &= \operatorname{ctg} (\alpha_3-/4 + q_3/(2R)) + 4R/(l_4 - 2q_4). \end{aligned} \quad (4)$$

Радіальний тиск на металеві труби на тангенційних ділянках визначається залежностями:

$$\begin{aligned} N_4 &= m_4 g \cos \alpha_4 + c_4 (q_3 - q_4) \sin(\alpha_3-/2 + q_3/(2R) + \theta_3), \\ N_5 &= \rho F_5 l_3 g \cos \alpha_4 + P_5(q_5), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $P_5(q_5)$  — сила притискання металеві труби, обважненої гірською породою:

$$P_5(q_5) = \int_0^{l_5 - q_5} \int_0^{\varphi_{\text{пор}}} p(t, q_5, \varphi) d\varphi dq_5. \quad (6)$$

Тут  $p(t, q_5, \varphi)$  — розподілена сила тиску гірської породи,  $\varphi_{\text{пор}}$  — радіальний кут прихоплення металеві труби породою.

Оскільки всі сили діють сумісно, доводиться враховувати інтегральну силу опору руху МБК, врахувавши, що у процесі руху їх співвідношення може змінюватися (2)–(6).

Якщо металева труба є циліндричною, маса її погонного метра

$$m_{\text{пог}} = \pi[\rho D_i^2 + (\rho_{\text{бур}} - \rho) d_i^2]/4, \quad (7)$$

де  $\rho_{\text{бур}}$  — густина бурового розчину,  $D_i$ ,  $d_i$  — зовнішній і внутрішній діаметри металевих труб.

### 3. ДІАГНОСТУВАННЯ ПРИХОПЛЕНЬ МЕТАЛЕВИХ ТРУБ

Оскільки навантаження (3) різко зростають із набором зенітного кута свердловини за експонентою, а у випадку виникнення прихоплення внаслідок обвалів або налипання гірських порід можливе значне зростання сил опору, що перешкоджають переміщенню металеві бурильної колони і можуть призвести до зупинки основних технологічних операцій буріння, розробка методики діагностики — аналітичного розрахунку процесу вивільнення металевих труб і оцінка їх силової взаємодії зі стінками свердловини на викривлених ділянках є надзвичайно актуальним завданням.

Вивільнення прихопленої металеві бурильної труби забезпечує сила натягу МБК, що зрівноважує зовнішні сили, та збурювальна осьова сила  $P = EF_5(q_4 - q_5)/l_5$ , яка має подолати силу опору, викликану в'язким тертям і тертям Стрібека. До того ж, вибір МБК має відповідати критеріям оптимальності та системі обмежень, що ві-

ТАБЛИЦЯ 2. Геометричні та фізичні характеристики бурильних труб.

TABLE 2. The geometric and physical characteristics of the drill pipes.

Метал	Алюміній АД 31	Дюралюміній Д 16	Сталь 40ХН	Титан BT1-0
$D_{тр}$ , мм	140	147	140	140
$d_{тр}$ , мм	130	125	118	128
$E$ , МПа	$7 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$
$[\sigma]$ , МПа	330	350	735	950
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2780	2800	7850	4400
$\nu$	0,34	0,34	0,28	0,32

дображають вимоги до умов стійкості, міцності спорудження та експлуатації свердловини.

Дослідження запропонованого методу для вивільнення прихоплених металевих труб було проведено для п'ятимасової бурильної колони:  $c_0 = 53$  МН/м,  $m_0 = 9855$  кг,  $\rho_{рід} = 1200$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,3$ , діаметри обважнених бурильних труб, виготовлених зі сталі 40ХН2МА:  $D_3 = D_4 = D_5 = 203$  мм,  $d_3 = d_4 = d_5 = 74$  мм. Основні параметри бурильних труб ( $D_1 = D_2 = D_{тр}$ ,  $d_1 = d_2 = d_{тр}$ ), виготовлених з різних металів, наведено у табл. 2 [7].

Проведені чисельні розрахунки уможливили встановити залежність сили висмикування металевих труб, моменту їх зрушення, характер процесу витягування від матеріялу, з якого вони виготовлені (рис. 2). Металеві бурильні труби періодично струшуються. До тих пір, поки динамічна сила опору ковзанню менша за статичну, МБК розтягується внаслідок виникнення імпульсу цих сил у зоні прихоплення. Потім прихоплена металева труба стискається, що приводить до зменшення пружної сили та гальмування переміщення.

Таким чином, рух прихопленої бурильної труби має коливний характер, у якому періодично змінюються фази прилипання та ковзання — висмикування. Талевий канат піднімає металеві труби та підживлює енергією МБК; тому коливання не згасають, незважаючи на втрату енергії у контакті зі свердловиною. Такий рух називають фрикційними автоколиваннями, оскільки він викликаний внутрішніми властивостями механічної системи, джерелом яких є тертя.

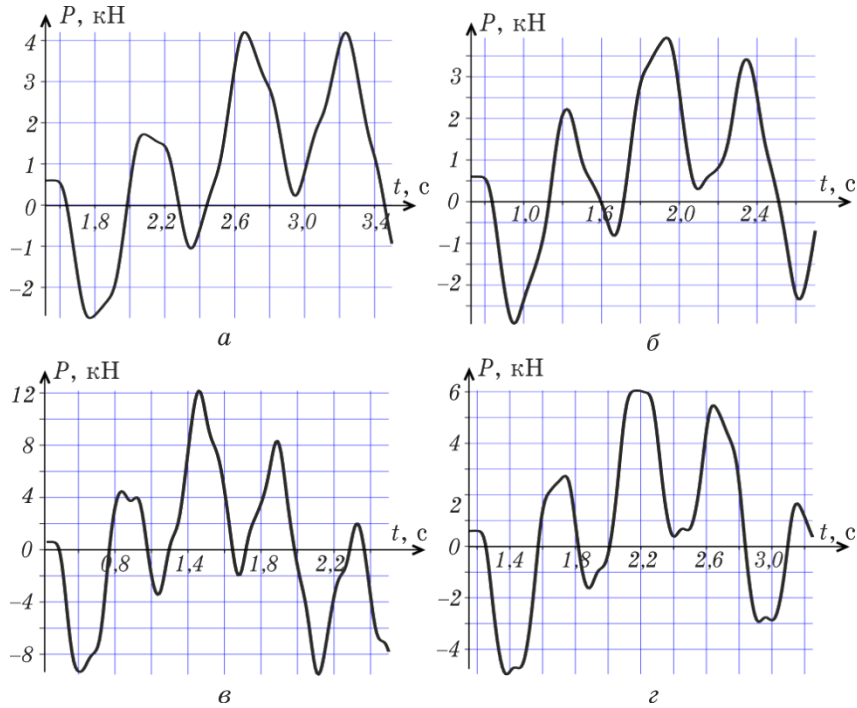
За допомогою складеного математичного моделю було визначено закони руху, швидкості та збурювальні сили (рис. 2) для контактної рівномірно розподіленої сили тиску гірської породи  $p = 1$  кН/м та інтегральної фрикційної взаємодії бурильних труб з кіркою свердловини  $F_{итр} = 6$  кН/м за умови значення швидкості талевого каната  $v_0 = 0,1$  м/с.

Розраховані величини збурювальних сил уможливають спрогнозувати критичні ситуації, пов'язані з процесом вивільнення при-



хоплення, оскільки максимальна величина збурювальної сили (табл. 3), що вивільняє прихоплену МБК, має не перевищувати допустимі значення напружень матеріалу бурильних труб, що знаходиться в межах міцності та надійності (табл. 2).

Оскільки алюмінієві бурильні труби мають найменший модуль пружності та найменшу густину, то вони й витримують найменші



**Рис. 2.** Збурювальна сила  $P$ , викликана фрикційними автоколиваннями, для металевих труб, виготовлених з:  $a$  — Al,  $б$  — Al-Cu-Mg,  $в$  — сталь,  $г$  — Ti.

**Fig. 2.** Disturbing force  $P$  caused by frictional self-excited oscillations for metal pipes made of:  $a$ —Al,  $б$ —Al-Cu-Mg,  $в$ —steel,  $г$ —Ti.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Геометричні та фізичні характеристики бурильних труб.

**TABLE 3.** The geometric and physical characteristics of the drill pipes.

Метал	Алюміній АД 31	Дюралюміній Д 16	Сталь 40ХН	Титан ВТ1-0
$[P_{\text{вн}}]$ , МПа	15,9	36,8	81,5	55,3
$[P_{\text{зн}}]$ , МПа	3,6	35,2	97,7	10,5
$[P]$ , кН	2,4	5,6	13,9	4,5
$[P_{\perp}]$ , кН	148,6	367,5	739,4	449,8

динамічні навантаження (табл. 2 і 3). Для вивільнення прихоплених Al-труб не рекомендовано застосовувати ударні способи; доцільнішими будуть застосування вібраційних способів. Поряд з тим, Al-труби є довговічними і стійкими до дії зовнішнього середовища, зокрема до морської води. Сірчаний газ, сірководень, аміяк мало впливають на швидкість їх корозії [8].

Перевагою використання МБК з дюралюмінієвих труб перед сталевими є їхні фізико-механічні властивості: низька питома вага, висока питома міцність, понижене значення модулів поздовжньої пружності та зсуву, корозійна стійкість в агресивному середовищі ( $H_2S$  і  $CO_2$ ), немагнетні властивості. При використанні Al-Cu-Mg бурильних труб необхідно передбачити комплекс заходів із захисту їх від корозійних пошкоджень. З метою захисту дюралюмінієвих труб від контактної корозії у свердловині можна оцинкувати сталеві замки. Зі збільшенням тривалості перебування Al-Cu-Mg бурильних труб у зоні підвищення температур їхні характеристики міцності поступово знижуються.

Необхідно також враховувати можливість підвищення температури бурового розчину в свердловині. Найбільш небезпечною для матеріалу бурильних труб є температура середовища вище  $60^\circ C$ , за якої умовна межа корозійної втоми сталі є найменшою.

За характеристиками міцності Ti-труби є аналогічними традиційним конструкційним сталям, але при цьому на 45% легші, а за корозійною стійкістю титан перевершує їх. Широке застосування титанових бурильних труб зумовлено їхніми фізико-хімічними характеристиками: витримують високі температури (до  $1668^\circ C$ ) і навантаження, стійкі від корозії, досить міцні та легкі. На внутрішньому діаметрі титанових бурильних труб не накопичуються солі й інша органіка. Титанові стопи характеризуються достатнім рівнем в'язкості руйнування, навіть за негативних температур аж до  $-100^\circ C$ . Цим пояснюється широке використання титанових бурильних труб у будівництві морських платформ для розвідування родовищ і добутку нафти та газу на шельфі у складних природних і геологічних умовах на глибинах від 200 до 2500 м. Разом з тим, вони мають високу вартість, але не потребують додаткових витрат. Однак у разі використання титану небезпечною є можливість його водневого окрихчення [9], особливо у морському нафтогазодобуванні. Це може привести до пониження пластичності та тріщиностійкості. Для вивільнення прихоплених Ti-труб рекомендовано застосовувати ударні, віброударні способи або вибухи.

#### 4. ВИСНОВКИ

Вибір найефективнішого способу ліквідації прихоплень металеві бурильної труби для конкретного випадку та послідовність їх засто-

сування або чергування різних способів мають спиратися на сукупності накопиченого досвіду та зібраної інформації про причини виникнення аварії та властивості металу, з якого виготовлено труби.

Таким чином, вибір способу ліквідації прихоплень металевих бурильних труб при нафтогазовому бурінні залежить від фізико-механічних характеристик металу та є достатньо неоднозначним. У зв'язку з цим необхідно детально розглядати пружньо-деформаційні властивості алюмінієвих стопів, сталей, а також перспективних титанових стопів для того, щоб розробити рекомендації з вибору матеріалу бурильних труб, залежно від протяжності та профілю свердловини, а також передбачених небезпечних для прихоплень зон.

При бурінні глибоких і надглибоких похило-скерованих свердловин, особливо, горизонтальних, надзвичайно важливо понизити напружено-деформований стан МБК, забезпечити безаварійну роботу в умовах екстремальних навантажень, які доводиться прикладати у випадку ліквідації аварії. Розроблений математичний модель вивільнення прихопленої МБК уможливорює шляхом чисельних розрахунків ще на етапі проектування методом послідовного діагностування попереджувати можливість виникнення та ліквідації прихоплень у розвіданих і спрогнозованих геологами небезпечних зонах. Дано рекомендації з вибору способу ліквідації прихоплень за напружено-деформованим станом металевих бурильних труб.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. M. D. Lubrecht, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, Iss. 5: 2484 (2012).
2. Z. Guan, Yo. Liu, Yu. Shi., K. Wei, J. Wang, H. Liang, and H. Zhang, *Procedia Eng.*, **7**: 304 (2010).
3. E. N. Andrusenko, V. I. Gulyaev, and N. V. Shlyun', *Mech. Solids*, **51**, Iss. 2: 234 (2016).
4. E. I. Kryzhaniv's'kyi, R. S. Hrabovs'kyi, and O. M. Mandryk, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 1: 117 (2013).
5. V. Moisyshyn, V. Yacyshyn, and O. Vytyaz, *Archives Mining Sci.*, **57**, Iss. 3: 601 (2012).
6. B. L. van de Vrande, D. H. van Campen, and A. de Kraker, *Nonlinear Dyn.*, Iss. 2: 159 (1999).
7. К. Г. Левчук, В. М. Мойсшин, І. В. Цідило, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1655 (2016).
8. O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and A. Rogal, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 7 (85) (2017).
9. K. Bateman, G. Turner, J. M. Pearce, D. J. Noy, D. Birchall, and C. A. Rochelle, *Oil Gas Sci. Technol.*, **60**, No. 1: 161 (2005).

## REFERENCES

1. M. D. Lubrecht, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, Iss. 5: 2484 (2012).

2. Z. Guan, Yo. Liu, Yu. Shi., K. Wei, J. Wang, H. Liang, and H. Zhang, *Procedia Eng.*, **7**: 304 (2010).
3. E. N. Andrusenko, V. I. Gulyaev, and N. V. Shlyun', *Mech. Solids*, **51**, Iss. 2: 234 (2016).
4. E. I. Kryzhanivs'kyi, R. S. Hrabovs'kyi, and O. M. Mandryk, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 1: 117 (2013).
5. V. Moisyshyn, V. Yacyshyn, and O. Vytyaz, *Archives Mining Sci.*, **57**, Iss. 3: 601.
6. B. L. van de Vrande, D. H. van Campen, and A. de Kraker, *Nonlinear Dyn.*, Iss. 2: 159 (1999).
7. K. G. Levchuk, V. M. Moisyshyn, and I. V. Tsidylo, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1655 (2016) (in Ukrainian).
8. O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and A. Rogal, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 7 (85) (2017).
9. K. Bateman, G. Turner, J. M. Pearce, D. J. Noy, D. Birchall, and C. A. Rochelle, *Oil Gas Sci. Technol.*, **60**, No. 1: 161 (2005).