

значенням пружно-деформованого стану стінок за комплексом сформульованих нами умов рівноваги деформаційних і силових параметрів двох циліндрів, з'єднаних коаксіально з радіальним натягом.

Висновки

На основі фізичного механізму пружної взаємодії контактних ділянок муфти і труби, з'єднаних з радіальним натягом, математично сформульовано умови рівноваги контактних тисків та балансу деформацій і натягу. Розроблена методика одночасно враховує кільцеві, радіальні і осьові деформації стінок та забезпечує розрахунок деформаційних і силових параметрів на нетонкостінних ділянках з'єднання муфти і труби, оскільки поєднує застосування формул Ламе та моментної теорії.

Література

1 Палійчук І.І. Пружна взаємодія з'єднаних з натягом циліндрів із змінною товщиною стінки // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 2 (19). – С.59-63.

2 Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Гостехиздат, 1953. – 608 с.

3 Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С.Д.Пономарева. – М.: Машгиз, 1958. – Т.2. – 974 с.

4 Еременко Т.Е., Мочернюк Д.Ю., Тищенко А.В. Герметизация резьбовых соединений обсадных колонн нефтяных и газовых скважин. – К.: Техніка, 1967. – 170 с.

УДК 622.24.053

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИНАМІКИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХОПЛЕНЬ КОЛОНИ УДАРНИМИ ПРИСТРОЯМИ

¹ Б.М.Малярчук, ² П.І.Огородніков, ¹ В.М.Світлицький

¹ ДК "Укргазвидобування", 04053, м. Київ, вул. Кудрявська, 26/88, тел. (044) 2721836, e-mail: svetlitsky@gasdob.com.ua

² МНТУ ім. акад. Бугая, 02660, м. Київ, пров. Магнітогорський, 3, тел. (044) 5515839, e-mail: ogorodnikov@mail.ru

Рассмотрены теоретические основы динамики ликвидации прихватов колонны ударными устройствами. Обосновано решающее значение выбора компоновки над и под УПП (устройством ликвидации прихватов), а также типа самого устройства (вибрационный, ударный) в зависимости от глубины и формы (искривления) скважины, возможной причины аварии, геологических условий зоны прихвата, характеристик породы и т.д.

Theoretical bases of dynamics of column freeze liquidation by impact devices are studied. The authors accentuate on significant value of arrangement of the device for freeze liquidation: type of device (vibration, impact) depending on a depth and forms (curvatures) of well; possible reasons of failure; geological terms of area of freeze, descriptions of rock and etc.

Боротьбу за зменшення аварійності можна проводити шляхом впровадження заходів з попередження аварій, або шляхом вдосконалення ловильного інструменту і методів ліквідації аварій. На основі досвіду бурових робіт у різних регіонах України і СНД було рекомендовано безліч заходів із попередження аварійності [1], однак аварійність, пов'язана з прихопленням бурового інструменту, залишається дуже високою як під час буріння нафтогазових свердловин, так і під час геологічного буріння. Такий стан справ у бурінні змушує до вдосконалення технологій і інструментів для ліквідації прихоплення на базі вивчення динамічних процесів у бурильній колоні. Особливо це стосується ліквідації прихоплення у свердловинах з викривленим стовбуром. Успішний хід ліквідації прихоплення пов'язаний, головним чином, з правильним вибором технічних засобів, режиму їх роботи і компоновань над ПЛП (пристрій

ліквідації прихоплення) і під ним, над верхньою межею прихоплення. Основним чинником, від якого залежить вибір способу ліквідації прихоплення, параметрів роботи ПЛП і його типу, є геологічні умови проводки свердловини і тип прихоплення.

Невірний вибір методики і механізмів призводить до ускладнення аварій. Науковий підхід до процесу ліквідації аварій і виконання необхідних техніко-організаційних заходів – запорука успіху під час ліквідації прихоплення та інших видів аварій.

Вибір компоновань над ПЛП і під ним залежно від типу самого пристрою (вібраційний, ударний) буде залежати, в основному, від таких показників: глибина і форма (викривлення) стовбура свердловини; можлива причина аварії; геологічні умови зони прихоплення (стійкість та інші властивості порід, які формують стінки свердловини), а також інші обставини, які ха-

рактизують прихоплення: можлива кількість шламу в свердловині, висота, на яку було піднято інструмент над вибоєм під час прихоплення, наявність циркуляції тощо.

На теперішній час значною мірою вивчені явища, які виникають під час ліквідації прихоплення вібраційними методами. Процеси, які протікають в зоні прихоплення, з врахуванням їх хвильової енергії, спричинені ударними і ударно-вібраційними пристроями дослідженні недостатньо. Ефект взаємодії віброуючої поверхні прихопленої труби з породою обумовлена ударним імпульсом та залежить від конкретних геологічних умов і фізико-механічних властивостей складу порід, які зумовили прихоплення.

Рух труби, яка прихоплена сипучим матеріалом і знаходиться під дією ударно-вібраційного навантаження, сприяє зменшенню сил взаємодії між окремими зернами породи. Це призводить до збільшення рухомості частинок, і маса навколо прихопленої труби стає схожою на в'язке середовище. Фізико-механічні властивості цього середовища характеризується коефіцієнтом вібров'язкості [2].

Якщо зона прихоплення представлена породами, які мають тиксотропні властивості (прилипання труб до глинистої кірки), то дія вібраційного поля є іншою. В зоні між стінками труби і породою, під дією вібраційного (хвильового) поля, яке передає енергію в породу, відбувається руйнування структури і виділення вільної води гідратними оболонками. Навколо води виникає розріджений шар [2], який сприяє збільшенню переміщення прихопленої частини колони під дією попереднього статичного навантаження. Відбувається зміна сухого тертя на гідродинамічне, що понижує опір переміщенню прихопленої колони.

У випадку, коли інструмент прихоплений за рахунок розклинювання труб великими шматками породи, коефіцієнт сухого тертя і сили зчеплення під дією післяударної вібрації інструменту між ними зменшується, що полегшує вивільнення інструменту під дією попереднього натягу. Таким чином, теоретично можна розглядати два випадки: дію на прихоплену зону колони сил в'язкого опору або дію тангенціальних сил сухого тертя.

Отже, прихоплена частина колони, за умови надання їй деякої рухомості, знаходиться в складному русі: рух під дією натягнутої колони (переносний рух) накладається хвильовий рух, спричинений ударом ПЛП, який викликає зміну характеру взаємодії поверхні прихопленої труби з зовнішнім середовищем.

Залежно від значення параметрів у системі прихопленої бурильної колони можна розглядати три типи переносного руху: регулярний – рух з постійної швидкістю (наприклад, під час встановлення нафтової ванни); прискорений – рух під дією вібрацій або хвильових процесів; і чисто коливний, коли рухомість прихопленої частини не реагує на прикладені статичні і динамічні навантаження.

Для визначення силових умов ліквідації прихоплення умовно розділимо систему на дві частини: верхню – до ПЛП і нижню – під ПЛП та врахуємо, що на нижню (прихоплену) частину діє рівнодійна сила

$$F(t) = Mg + P_0 + F_{yo}(t), \quad (1)$$

де: M – маса прихопленої частини і компоновки між ПЛП і верхньою межею прихоплення; P_0 – статичний натяг; $F_{yo}(t)$ – ударна сила (синусоїдальний імпульс).

Тоді рівнодійна сила, прикладена до прихопленої частини (без урахування реакції), в післяударний період (до затухання коливних процесів) буде

$$F(t) = Mg + P_0 + F_{zam}(t), \quad (2)$$

де $F_{zam}(t)$ – змінні сили, викликані хвильовим процесом в перерізах труб.

Розглянемо можливе переміщення прихоплених труб під дією тільки сили P_0 . При цьому будемо виходити з лінійної залежності між контактними (дотичними) напруженнями τ і осьовими переміщеннями u поперечних перерізів прихопленої частини колони (рис. 1)

$$\tau = -ku, \quad (3)$$

де: k – коефіцієнт дотичного опору породи в місці прихоплення.

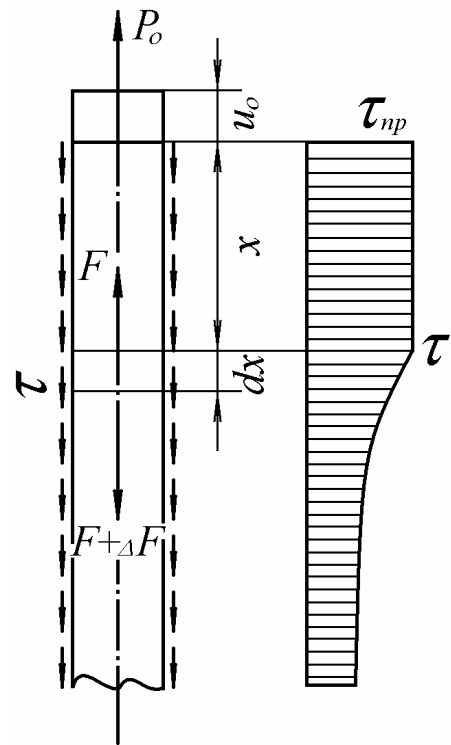


Рисунок 1

З умови рівноваги елемента dx довжини колони (прихопленої частини) і сумісності їх переміщення з породою, яка викликала прихоплення, отримаємо такий розв'язок

$$\frac{du}{dx} = \frac{F}{E_n S}; \quad \tau \pi D = -\frac{dF}{dx}, \quad (4)$$

де: E_n – модуль пружності в перерізі; S – площа перерізу; D – діаметр труби.

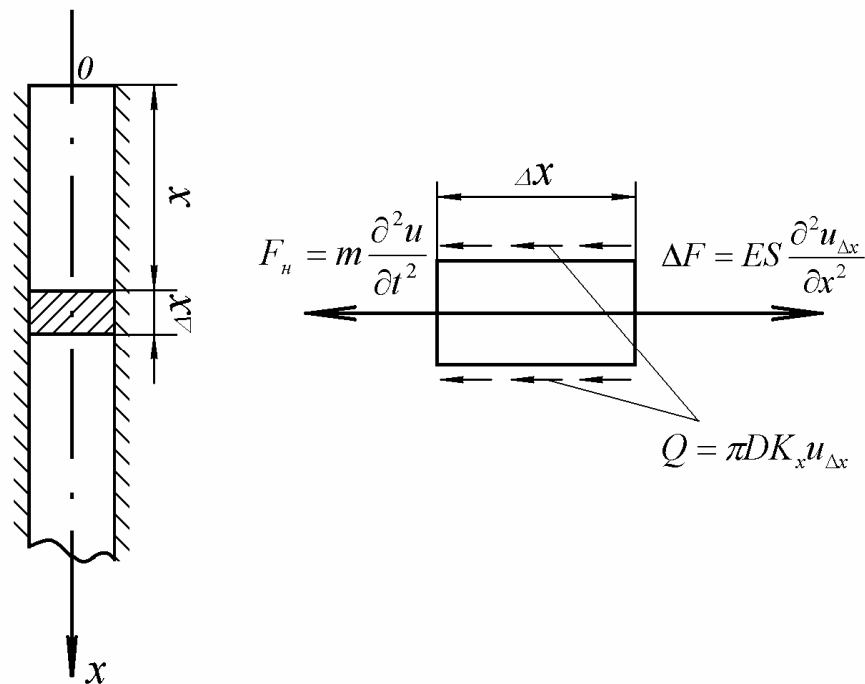


Рисунок 2

З урахуванням (3) де $n = \sqrt{\frac{k}{Dh}}$ отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = n^2 F. \quad (5)$$

Розв'язання цього рівняння допоможе знайти осові зусилля

$$F = C_1 e^{-nx} + C_2 e^{-nx}. \quad (6)$$

Розглянемо випадок, коли прихоплення по довжині значне (защемлення). У цьому випадку можемо вважати, що нижня частина прихоплення не дає зриву (по всій довжині). Тоді, приймаючи трубу як напівнескінченну ($t = 0, C_1 = 0$), при $x = 0$

$$F = P \cdot e^{-nx}; \tau = \frac{nP}{\pi D} e^{-n}; u = \frac{P}{nE_n \cdot S} e^{-nx}. \quad (7)$$

Якщо $F > P_{np} = \frac{T_0}{n}$, де $T_0 = \pi D \tau_{np}$, то на ділянці l_0 , яка дотикається до вільного кінця прихопленої частини труб, відбувається зрив

$$l_0 = \frac{P}{T_0} - \frac{1}{n}; \quad u_0 = -\frac{1}{2E_n F} \left(\frac{P^2}{T_0} + \frac{T_0}{n^2} \right). \quad (8)$$

Таким чином, під дією статичного натягу, за визначених умов можливий зрив. У разі застосування ПЛП необхідно розраховувати вузол роз'єднання на навантаження, яке б забезпечувало зрив, що полегшує подальшу ліквідацію прихоплення.

Розглянемо поведінку прихопленої частини бурильної колони під впливом хвильового процесу, який виникає під дією ударного імпульсу.

Для цього вісь x спрямуємо вздовж осі труб і виділимо елемент труби dx на відстані x від початку координат (рис. 2). Позначимо переміщення цього елемента відносно зони прихоплення (відносно породи) через $u(x, t)$. Надалі таке переміщення будемо називати відносним. Припустимо, що взаємодія породи, яка оточує трубу, лінійно залежить від переміщення труби під дією ударного імпульсу і післяударних коливань відносно породи, яка зумовила прихоплення

$$\tau = k_x u(x, t), \quad (9)$$

де: τ – дотична поздовжня напруження на стінках труби; k_x – коефіцієнт пропорційності, що стосується перерізу труби, який розглядається.

За такого припущення рівнодійні сили взаємодії дорівнюватимуть

$$Q = \pm \pi D_3 k_x u(x, t) dx, \quad (10)$$

де D_3 – зовнішній діаметр труб.

Поздовжня сила, яка виникає в трубі, буде $\Delta F = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$, де: E – модуль Юнга; S – площа перерізу труби.

Силу інерції для даного елемента труби запишемо як $F_{in} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx$.

Спроектувавши сили на вісь x і виконавши елементарні перетворення, отримаємо диференціальні рівняння коливань прихопленої частини труб бурильної колони

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm b^2 u = 0, \quad (11)$$

де $b_u^2 = \frac{\pi D k_x}{m}$, $m = \rho F$ – маса одиниці довжини труби.

Знак „-“ за b_u^2 зберігається в тому випадку, коли рух елемента труби спрямований від положення рівноваги, у разі зворотного руху візьмемо „+“. Для визначення максимальних значень вібронапружень і переміщень в трубах обмежимо розгляданням третьої чверті періоду, а коефіцієнт b^2 візьмемо зі знаком „-“.

Рівняння (11) не враховує розсіювання енергії в матеріалі труби.

Для кінцевого отримання рівняння коливань прихопленої частини труб представимо τ в більш загальній формі: $\tau = \phi(u)$.

Тоді дотична рівнодійних сил взаємодії між стінками труби і породою запишеться

$$Q = \phi(u)dx, \quad (12)$$

де $\phi(u)$ – деяка функція, яка залежить від переміщення і фізико-механічних властивостей прихоплення – прилеглої зони контакту між трубою і породою.

В цьому випадку, більш узагальнене рівняння буде виглядати так:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{m(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left[x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{m(x)} \phi(u) = 0. \quad (13)$$

Рівняння (13) представлене загальним рівнянням коливань прихопленої частини бурильної колони. Воно враховує зміну перетинів труб прихопленої частини компонування, дійсний опір породи, а також розсіювання енергії в матеріалі труб.

Рівняння (13) можна спростити, якщо прийняти гіпотезу Фохта для врахування розсіювання енергії в матеріалі труб, сили взаємодії труби і породи пропорційними першому ступеню зміщення, а площу поперечного перерізу прийняти постійною по довжині прихопленої ділянки труби. Тоді (13) запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a_\tau^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2n \frac{\partial u}{\partial t} \pm b^2 u = 0, \quad (14)$$

де $a_\tau^2 = \frac{ES}{m}$.

Отже, ми отримали відоме телеграфне рівняння. Тоді дослідження умов ліквідації прихоплення ударним способом для прихопленої частини колони зводиться до розв'язання лінійного диференціального рівняння в часткових похідних за відповідних початкових умов з урахуванням процесів, які виникають в граничних зонах між стінками труби і породою.

Для розв'язання рівняння (11) використаємо метод Фур'є [3]. При цьому розкладемо функцію $u(x,t)$ за власними функціями

$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(i) v_n(x)$, де $v_n(x)$ – власні функції поздовжніх коливань прихопленої частини колони нижче ударного пристрою.

Отримане телеграфне рівняння дає можливість використати імпедансний метод, який для подальших досліджень застосовується в теорії довгих електричних ліній [4]. При цьому використаємо електромеханічну аналогію [5]. Тобто протидія магнітного поля розповсюдженню струму вздовж кабеля аналогічна протидії опору руху труб в прихопленій зоні. Таким чином, теорія прихопленої частини бурильної колони як довгого стрижня в післяударний період ідентична теорії електричної лінії. Рівняння електричної лінії, відповідно до рівняння (11), після елементарних перетворень запишемо як

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u, \quad (15)$$

де $r_1 = RC - GL$; $r_2 = RG$; $C^2 = \frac{1}{LG}$.

В електричній лінії протяжністю від $x = 0$ до $x = l$ будуть такі постійні, віднесені до одиниці довжини: R – опір, L – індуктивність, C – ємність, G – провідність витікання НМ (всі величини відносяться до одиниці довжини).

Для прихоплення труб, як стрижня, диференціальне рівняння запишемо

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r_1 \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u, \quad (16)$$

де: $r_1 = RK + GM$; $r_2 = RG$; $C^2 = \frac{1}{MK}$; M – маса; K – податливість; R – опір втрат, G – провідність демпфування.

При складанні рівняння відрізка прихопленої колони, виходячи з електромеханічної аналогії, можна записати

$$u_2 - u_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x = -M \delta x \frac{\partial u}{\partial t} - R \delta x \cdot v. \quad (17)$$

Під час обчислення стиснутого елемента стрижня можна нехтувати змінною сили через інерціальну реакцію, і тоді

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -k \frac{\partial u}{\partial t} - Gu, \quad (18)$$

де G – провідність демпфування.

У випадку періодичних зміни $\partial / \partial t = j\omega$ і рівняння (17) та (18) приймають вигляд

$$-\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M)v; \quad (19)$$

$$-\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} = \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right). \quad (20)$$

Отже,

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \tilde{u} = \quad (21)$$

$$= j\omega M \cdot j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \left(1 - j \frac{R}{\omega M} \right) \left(1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{(MK)^{-2}}} \right) \tilde{u}$$

або

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} = -k^2 \tilde{u}, \quad (22)$$

де

$$-k^2 = (R - j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \quad (23)$$

і

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{-(R - j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right)} = \\ &= \sqrt{\omega^2 M \frac{1}{MK} \left(1 - j \frac{1}{MK} \right) \left(1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}} \right)} = \\ &= \sqrt{\omega^2 L \frac{1}{MK} \left(1 - \frac{j\eta}{2} \right)} = k_0 \left(1 - \frac{j\eta}{2} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

де $k_0 = \frac{\omega}{1/MK}$; $k = ES$ і $\eta = \frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}}$

квадрат малих величин.

При вилученні квадратного кореня необхідно брати знак плюс, оскільки тільки в цьому випадку ми отримуємо хвилі, амплітуди яких зменшуються з віддалю. Загальним рівнянням хвильових рівнянь (15), (16) буде [5]

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma} &= \tilde{A} \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x = \\ &= \tilde{\sigma}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tilde{v} &= \tilde{C} \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x = \\ &= \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x, \end{aligned} \quad (26)$$

де $\tilde{\sigma}_S$ і \tilde{v}_S – сила і швидкість на глибині, що відповідає верхній межі прихоплення за $x = 0$.

З рівняння (19) отримуємо співвідношення

$$\begin{aligned} -\tilde{u} \tilde{k} \sin \tilde{k}x + \tilde{B} \tilde{k} \cos \tilde{k}x &= \\ = (R + j\omega M) (\tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x). \end{aligned} \quad (27)$$

Оскільки це співвідношення має виконуватись за всіх значень x , коефіцієнти при синусах і косинусах в правій і лівій частині мають співпадати

$$\tilde{\sigma}_S = \tilde{D} \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{Z}\tilde{D} \quad (28)$$

$$\tilde{B} = -\tilde{v}_S \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{v}_S \tilde{Z}, \quad (29)$$

де

$$Z_C = j \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = \sqrt{\frac{R + j\omega M}{G + j\omega \frac{1}{MK}}} \quad (30)$$

характеристичний імпеданс стрижня (прихопленої частини колони).

У разі набуття колоною рухомості зовнішнє “тертя” між стінками прихоплених труб і породою незначні. Тож характеристичний імпеданс прихоплених труб, які вивільнюються, має вигляд

$$\bar{Z}_C = \sqrt{M\sigma\lambda_E} \left[1 + j \frac{\eta_k}{2} \right] = M_C. \quad (31)$$

Тоді рівняння може бути записане в такому вигляді

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_S \cos \bar{k}x + j\tilde{v} \bar{Z}_C \sin \bar{k}x \quad (32)$$

та

$$\tilde{v} = \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \frac{\tilde{u}_0}{j\bar{Z}_C} \sin \bar{k}x. \quad (33)$$

Найбільш важлива величина – вхідний імпеданс Z_S стрижня (труб), замкнутих на імпеданс навантаження \bar{Z}_l (наприклад, прихоплення долота, амортизатора над долотом, чи вибійного двигуна, який знаходиться нижче зони прихоплення).

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\sigma}_l}{\tilde{v}} = \bar{Z}_l &= \frac{\bar{v}_S \cos \bar{k}l - j\bar{v}_S \sin \bar{k}l}{\bar{v}_S \cos \bar{k}l + (j\bar{v}_S / \bar{Z}_C) \sin \bar{k}l} = \\ &= \frac{(\bar{\sigma}_S / \bar{v}_S) - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 + (\bar{v}_S / j\bar{v}_S)(1 / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l} = \\ &= \frac{\bar{Z}_C - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 - j(\bar{Z} / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l}. \end{aligned} \quad (34)$$

Це дає підстави рекомендувати до використання імпедансного методу для розв’язання задач динаміки ліквідації прихоплень ударними пристроями.

Література

- 1 Ветров А. К., Коломеец А. В. Аварии в разведочном бурении и способы борьбы с ними. – М.: Недра, 1969. – 178 с.
- 2 Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 257 с.
- 3 Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Изд. физ. матем. лит, 1960. – 207 с.
- 4 Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
- 5 Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971. – 557 с.