

НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 620.191.33:620.194.8

DOI: 10.31471/1993-9965-2018-1(44)-38-47

ОЦІНКА ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА УМОВИ РУЙНУВАННЯ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПІД ЧАС СПУСКО-ПІДІЙМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

О.Ю. Витязь, Р.С. Грабовський, В.В. Турлич, В.І. Артим

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727182,

e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Визначено умови, за яких при спуско-підіймальних операціях можливе руйнування бурильних труб, що містять зовнішню або внутрішню поперечні кільцеві тріщини. При цьому за результатами експериментальної оцінки силового критерію руйнування металу резервних і експлуатованих бурильних труб встановлено взаємозв'язок між глибиною критичних зовнішніх або внутрішніх поперечних кільцевих тріщин в бурильних трубах та вагою бурильної колони (з урахуванням впливу динамічних навантажень при спуско-підіймальних операціях). Встановлено, що динамічні навантаження при опусканні колони експлуатованих бурильних труб є більш небезпечними на глибинах понад 3,7 км, тоді як на менших глибинах більш небезпечні динамічні навантаження, що виникають при їх підйманні. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини при підйманні експлуатованих бурильних колон на глибинах понад 1,1 км є більш небезпечними за зовнішні, в той час як на глибинах до 1,1 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

Ключові слова: критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, критичний розмір зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, характеристична глибина зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини.

Определены условия, при которых при спуско-подъемных операциях возможно разрушение бурильных труб с внешней или внутренней поперечными кольцевыми трещинами. При этом по результатам экспериментальной оценки силового критерия разрушения металла резервных и эксплуатируемых бурильных труб установлена взаимосвязь между глубиной критических внешних или внутренних поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и весом бурильной колонны (с учетом влияния динамических нагрузок при спуско-подъемных операциях). Установлено, что динамические нагрузки при спуске колонны эксплуатируемых бурильных труб более опасны на глубинах свыше 3,7 км, в то время как на меньших глубинах более опасными являются динамические нагрузки, возникающие при подъеме колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при подъеме эксплуатируемых бурильных колонн на глубинах свыше 1,1 км опаснее внешних, в то время как на глубинах до 1,1 км более опасны внешние поперечные кольцевые трещины.

Ключевые слова: критический коэффициент интенсивности напряжений, критический размер внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины, характеристическая глубина внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины.

The conditions of drill string failure during tripping operations with external or internal transverse annular cracks were defined. At the same time, considering the experimental evaluation of the force criterion for failure of metal of backup and operated drill string pipes, the interrelationship between the depth of the critical external or internal transverse annular cracks in drill string pipes with the weight of the drill string was established, considering the effect of dynamic loads during tripping operations. It was determined that dynamic loads during run-in-hole operations are more dangerous at depths of more than 3.7 km, while at lower depths, the dynamic loads occurring during pulling out of string are considered more dangerous. It was demonstrated that, when pulling out operated drill strings, internal transverse annular cracks at depths exceeding 1.1 km, are more dangerous than external ones, while at depths up to 1.1 km the external transverse cracks are more dangerous.

Key words: critical stress intensity coefficient, critical size of external or internal transverse annular crack, characteristic depth of external or internal transverse annular crack

Вступ

На сьогодні глибинне буріння у світі є одним із перспективних напрямів вирішення проблеми

збільшення видобутку енергоресурсів. Величезні запаси нафти і газу в Україні розвідані на території Дніпрово-Донецької западини і Карпатської нафтогазової провінції на глибині бли-

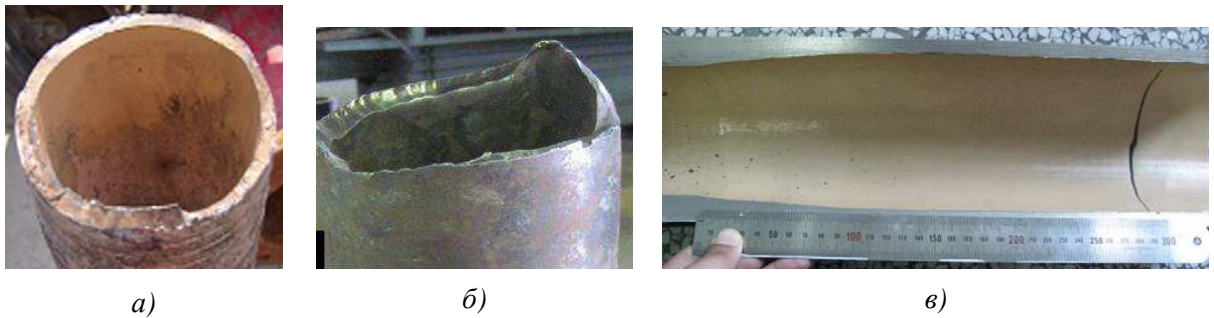


Рисунок 1 – Втомне руйнування БТ [5] (а), [6] (б) та морфологія первинної поверхні тріщини [7] (в)

зко 6,5-7 тисяч метрів. Однак буріння на таких глибинах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій, пов'язаних із виходом з ладу елементів бурильних колон (БК). Відомо, що в інтервалі буріння 2500-4500 м кількість відмов зростає у 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 метрів – в 9,8 разів [1].

При роторному бурінні аварійні ситуації, спричинені дією на бурильну трубу (БТ) експлуатаційних навантажень та впливом промислової рідини [2-8], можна поділити на три основні групи: руйнування труб у висадженій частині, руйнування замкових різьбових з'єднань, руйнування по гладкій частині труб. Найбільш часто зустрічається поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70% від загальної кількості аварій [1, 3, 10].

Характерною особливістю руйнувань БТ є те, що вони відбуваються раптово, найчастіше під час спуско-піднімальних операцій (СПО), які при бурінні глибоких свердловин складають до 80% від загального виробничого часу і перевищують час механічного буріння в 3-3,5 рази, причому за весь час буріння свердловини опускають і піднімають до 70-80 тис. свіч [1].

Аналіз аварій елементів БК в об'єднанні БУ "Укрбургаз" засвідчив [11, 12], що у більшості випадків їх причиною є спільний вплив втомного руйнування та корозивних середовищ. Так, у 2007 році частка аварій, пов'язаних з руйнуваннями елементів БК, складала 40% від їх загальної кількості, у 2008 р. – 50%, 2009 р. – 50%, 2010 р. – 42,8%. Розподіл відмов свідчить, що близько 41% аварій, спричинених корозійно-втомними руйнуваннями БК, відбувається по тілу БТ, 42% спричинено руйнуванням різьбових з'єднань, 17% – інших частин колони. Причому руйнування труб по тілу відбувається за таким розподілом: 80% – БТ, 20% – обважені бурильні труби (ОБТ), а зокрема по різьбовому з'єднанні: 80% – ОБТ, 20% – БТ. За 2015 та 2016 рік було зафіксовано відповідно 29 та 18 руйнувань здебільшого по тілу труби. Основною причиною таких руйнувань було утворення мікротріщин, їх стрімкий розвиток та обрив труби (відповідно 24 та 12), що становить близько 80% від усієї кількості. Крім того, відбулось 13 обривів на відстані до 1 метра від торця муфти чи ніпеля (найчастіше в межах від 0,5 до 0,6 метра). Орієнтовна кількість відпра-

цьованих годин обірваних труб знаходилась в межах від 6000 до 15000 годин, в тому числі після дефектоскопії – від 30 до 380 годин. Це свідчить про те, що працюючі в свердловині труби мали механічні пошкодження, які відтак ставали концентраторами напружень, зменшуючи термін експлуатації БТ [3, 11, 12].

Таким чином, у більшості випадків неконтрольоване поперечне руйнування тіла труби відбувається під дією значних експлуатаційних навантажень, високих робочих тисків та за умови досягнення поперечної замкнутої або напівеліптичної тріщин, що зароджується та розвивається в місцях концентраторів напружень через пошкодження роторними клинами [1, 3], критичних розмірів або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, заминання та волосин) [6], а також у разі порушення технології СПО (наприклад, піднімання на одному стропі) [1, 3]. Причиною руйнування БТ по тілу можуть бути й інші концентратори напружень, такі як корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до зародження та розвитку макротріщин [4, 10].

Руйнування елементів бурових колон також пов'язане зі специфікою буріння. Причому на великих глибинах воно визначається домінуючим впливом відповідних силових факторів: величиною, напрямом та характером виниклих в процесі буріння та СПО експлуатаційних навантажень, які зумовлюють розвиток у місцях пошкоджень тріщин в поперечному перерізі тіла труби [5-7] (рис. 1) або бурового замка [4, 6].

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації БК вимагає підвищеної уваги до оцінювання виявлених при технічному діагностуванні дефектів та аналізу експлуатаційних умов при прийнятті відповідного інженерного рішення.

Оскільки в процесі СПО, спричинених впливом робочих навантажень, найбільш поширеним є руйнування БТ в поперечному перерізі шляхом відриву, то важливим питанням є визначення умов такого руйнування.

Отже, розрахунково-експериментальне оцінювання умов, за яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів БК є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета роботи – оцінювання впливу експлуатаційних навантажень та зміни властивостей металу в процесі тривалої експлуатації БТ, що містять зовнішні або внутрішні кільцеві тріщини, на умови їх руйнування під час СПО, з використанням підходів механіки руйнування.

Методична процедура досліджень та розрахунків

Оцінювання величини навантаження верхнього кінця БК під час СПО

Досліджували навантаженість під час СПО БК, складених із резервних (товщина стінки $t = 9$ мм) та експлуатованих протягом 23 років (товщина стінки $t = 8$ мм) БТ з умовним діаметром 127 мм групи міцності “Л”.

У процесі СПО важливим є визначення навантаженості верхнього кінця БК, тобто навантаження, яке діє на гак бурової лебідки. Це дає змогу більш точно визначити довговічність труб [1]. В роботах [13, 14] визначено вплив статичної ваги Q БК, а також досліджено вплив тривалості експлуатації БТ та оцінено умови їх руйнування під час СПО.

Вплив динамічних навантажень, що виникають при підйманні [15] колони БТ визначали з рівнянь руху мас (1), а при опусканні [16] колони БТ – з рівнянь руху мас (2). Отже, рівняння (1) та (2) відображають відповідно розрахункові схеми підймання (рис. 2, а) та опускання (рис. 2, б) колони труб, розподілені маси якої замінюються дискретними масами m_1 та m_2 , з'єднаних між собою пружними елементами

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{S}_1 = F - (S_1 - S_2) \cdot C_{12} \\ m_2 \cdot \ddot{S}_2 = (S_1 - S_2) \cdot C_{12} - Q \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{S}_1 = (S_1 - S_2) \cdot C_{12} - F \\ m_2 \cdot \ddot{S}_2 = Q - (S_1 - S_2) \cdot C_{12} \end{cases}, \quad (2)$$

де S_1, S_2 – відповідно переміщення верхнього та нижнього кінців БК;

Q – статична вага БК вага труб і об'єкту нижнього згідно з рівнянням [13, 14];

F – сила, яка відповідає зведеному до гака зусиллю на валу лебідки;

$$C_{12} = \frac{C_k \cdot C_m}{C_k + C_m} - \text{зведена жорсткість кана-$$

тів талевої системи ($C_k = \frac{E_k \cdot A_k \cdot (U_{mc} - 2)}{h_c}$) і

колони БТ ($C_m = \frac{2 \cdot E_m \cdot A_m}{l}$);

$$m_1 = I_{\delta} \cdot \left(\frac{U_{mc}}{r} \right)^2 + m_{T\delta} + m_{III} + m_K - \text{зведе-}$$

на маса барабана лебідки та талевої системи;

$$m_{III} = \frac{I_{ш} \cdot U_{mc}}{6 \cdot r_{III}^2} \cdot (U_{mc} + 1) \cdot (2U_{mc} + 1) - \text{зве-}$$

дена маса шківів талевого блоку та кронблоку;

$$m_K = \frac{U_{mc}^3 \cdot h_c \cdot q_k}{3g} \left(1 + \frac{3H}{U_{mc} \cdot h_c} \right) - \text{зве-}$$

дена маса каната;

$$m_2 = m_0 + \frac{1}{3} m_m - \text{зведена маса БТ } m_m \text{ і об-}$$

важеного низу m_0 ;

U_{mc} – кратність поліспасти (10);

I_{δ} – момент інерції барабана лебідки (2250,0 кг/м²);

$I_{ш}$ – момент інерції шківа (75,25 кг/м²);

h_c – довжина проміжної вітки талевого канату (35 м);

$r_{ш}$ – радіус навівання каната на барабан лебідки (0,835 м);

E_k – модуль пружності каната ($1,2 \cdot 10^{11}$ Н/м²);

A_k – площа поперечного перерізу каната ($5,64 \cdot 10^{-4}$ м²);

A_m – площа поперечного перерізу труби БК;

H – довжина ведучої вітки каната (45 м);

q_k – вага погонного метра каната (50,0 кг/м).

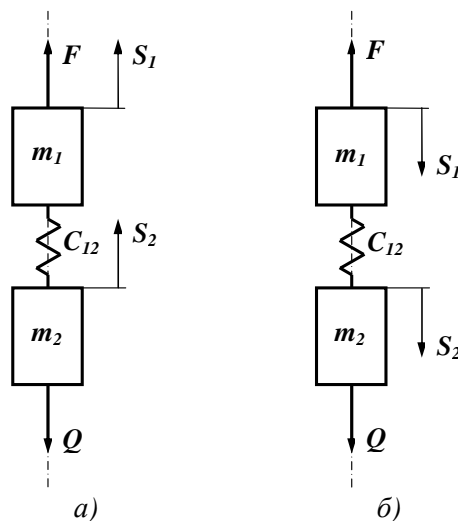


Рисунок 2 – Двомасова розрахункова схема підймання (а) та опускання (б) колони БТ

Розв'язок системи рівнянь (1) [15] дозволяє визначити максимальне значення сили пружного зв'язку

$$F_{c \max} = \frac{C_{12} \cdot V_{12}}{p} + \frac{C_{12} \cdot (F_M - Q)}{m_1 \cdot p^2} + 0,57 \cdot \frac{q_F \cdot t \cdot C_{12}}{m_1 \cdot p^3} + Q, \quad (3)$$

$$\text{де } p = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}},$$

V_{12} – швидкість підймання БК.

При обчисленні сили F враховували ту обставину, що швидкість підймання бурової

Таблиця 1 – Характеристика підйомного механізму бурової установки БУ 5000

№ швидкості	Швидкість підйому БК V, м/с	Навантаження на гаку, кН	Діапазон глибини підйому БК, м	
			t = 8 мм	t = 9 мм
I	0,23	2220	5000 м – 3925 м	5000 м – 4385 м
II	0,35	1490	3925 м – 2930 м	4385 м – 2655 м
III	0,56	935	2930 м – 0 м	2655 м – 0 м
IV	0,86	605	–	–
V	1,31	400	–	–
VI	2,10	255	–	–

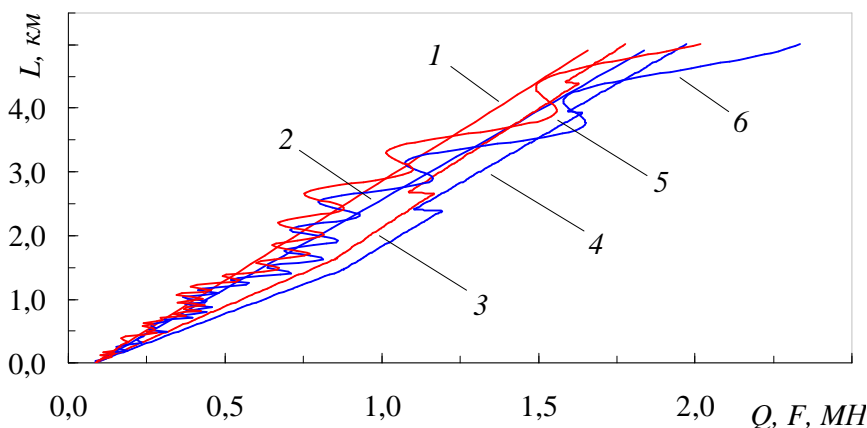


Рисунок 3 – Взаємозв’язок між довжиною L експлуатованої (1, 3, 5) і резервної (2, 4, 6) колон бурових труб та їх статичною Q (1, 2) [13] і динамічною F вагами у процесі підймання (3, 4) та опускання (5, 6)

колони залежить від її довжини, тобто діючого навантаження на гаку і визначається з нормативів машинно-ручного та ручного часу на підймання та опускання бурових свічок.

Результати обчислень зусилля Q під час СПО БК одержані в роботах [13, 14] у вигляді графічної залежності величини статичної ваги від довжини БК (рис. 3, криві 1, 2).

Результати обчислень динамічного зусилля при підйманні розглядуваних колон БТ згідно з рівнянням (3) із врахуванням оптимальних швидкостей підймання БК, які зведені в табл. 1, відображені графічною залежністю величини сили пружного зв’язку від довжини БК (рис. 3, криві 3, 4). При цьому врахували, що за технологією СПО швидкості IV, V та VI використовують лише при СПО з незавантаженим елеватором [17], що забезпечує розрахунковий ресурс змінних вузлів і деталей лебідки і її привода.

Операція опускання колони в свердловину є однією з найбільш відповідальних при виконанні СПО. Вона складається із трьох етапів: розгону, усталеного руху колони і гальмування. Причому основну увагу при опусканні колони труб слід зосередити на динамічних процесах на кінцевому етапі руху, тобто в період гальмування [19, 20].

Після припинення дії гальмівної сили рівняння руху мас набудуть такого вигляду:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{S}_1 = (S_2 - S_1) \cdot C_{12} \\ m_2 \cdot \ddot{S}_2 = Q - (S_2 - S_1) \cdot C_{12} \end{cases} \quad (4)$$

Розв’язок системи рівнянь (4) [0] дозволяє обчислити силу пружного зв’язку, що змінюється за законом:

$$F_c = \left(A \cdot \sin pt + B \cdot \cos pt + \frac{q \cdot t}{p^2 \cdot m_1} + \frac{Q}{C_{12}} \right) \cdot C_{12}, \quad (5)$$

де $q = \frac{F_{max}}{t_m}$ – інтенсивність наростання гальмівної сили від нуля до максимального значення F_{max} . Причому, як показали дослідження [0], раціональний час наростання гальмівного зусилля $t_{nm} = 4$ с. Постійні інтегрування мають значення:

$$B = S_{21}(t_2) - \frac{Q}{C_{12}}; \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{p} \cdot \left(V_{21}(t_2) - \frac{q}{p^2 \cdot m_1} \right),$$

де $S_{21}(t_2)$, $V_{21}(t_2)$ – деформація та швидкість пружного елемента наприкінці другого етапу руху колони.

$$S_{21} = \frac{V_{12}(t_1)}{p} \cdot \sin pt + \left(S_{21}(t_1) - \frac{Q}{p^2 \cdot m_2} \right) \cdot \cos pt + \frac{Q}{p^2 \cdot m_2}, \quad (7)$$

Таблиця 2 – Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Jc} .

Труба	Група міцності	Термін експлуатації, роки	K_{Jc} , МПа $\sqrt{м}$					K_{Jc}^{cep} , МПа $\sqrt{м}$
			0	145,2	144,7	142,7	135,3	
36Г2С	Л	0	145,2	144,7	142,7	135,3	146,2	142,8
		23	105,8	98,8	99,9	96,9	93,6	99,0

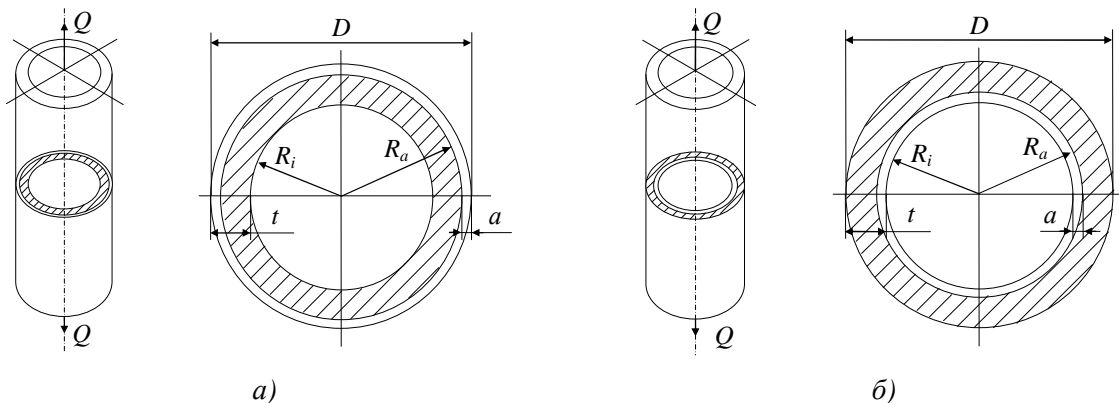


Рисунок 4 – Пустотілий циліндр із зовнішньою (а) та внутрішньою (б) поперечними кільцевими тріщинами під дією осевого навантаження [23]

$$V_{21} = V_{21}(t_1) \cdot \cos pt - (p \cdot S_{21}(t_1) - \frac{Q}{pm_2}) \cdot \sin pt. (8)$$

За результатами обчислення динамічного зусилля при опусканні на етапі гальмування розглядуваних колон БТ згідно з рівнянням (5) із врахуванням рівнянь деформації (7) та швидкості (8) пружного елемента наприкінці другого етапу руху колони, одержали графічну залежність величини сили пружного зв'язку від довжини БК (рис. 3, криві 5, 6).

Згідно з одержаними результатами (див. рис. 3) динамічні навантаження при опусканні колони резервних БТ є більш небезпечні на глибинах понад 3,5 км, а при опусканні колони експлуатованих БТ – на глибинах понад 3,7 км, тоді як динамічні навантаження при підйманні колони резервних БТ більш небезпечними в діапазоні глибин від 3,5 км до 0, а при підйманні колони експлуатованих БТ – відповідно від 3,7 км до 0.

Для оцінки впливу динамічних навантажень та тривалості експлуатації труб БК на умови їх руйнування під час СПО використали методику запропоновану в роботі [22]. Крім того, використали представлені у роботах [13, 14] результати експериментального визначення величини J_{Jc} резервної і експлуатованої БТ з умовним діаметром 127 мм групи міцності “Л” (див. табл. 2).

За результатами розрахунково-експериментальної оцінки впливу динамічних навантажень на умови руйнування досліджуваних труб БК, що містять зовнішні або внутрішні кільцеві тріщиноподібні дефекти під час СПО, визначали глибину критичної для БТ внутрішньої або зовнішньої кільцевої поперечної тріщини a_c .

Оцінка умов руйнування бурильних труби із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною, що перебуває під дією осевого навантаження

Для визначення умов, за яких можливе руйнування при спуску досліджуваних БТ груп міцності “Л”, що містять зовнішню поперечну кільцеву тріщину глибиною (a/t), розглядали розрахункову схему, зображену на рис. 4, а.

Для підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень K_I вздовж фронту зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (рис. 4, а) використовували залежність [0]:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \frac{F}{\sqrt{Y}}, (9)$$

де $F = \frac{1 - R_{ia}^2}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}\right]^2 - R_{ia}^2}$; $R_{ia} = \frac{R_i}{R_i + t}$;

$$Y = 0,8 + (1 - R_{ia}) \cdot \frac{a}{t} \cdot \frac{H}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \cdot \frac{a}{t}\right]}$$

$$H = 4 + 1,08 \cdot \frac{R_{ia}}{(1 - R_{ia}) \cdot \left(1 - \frac{a}{t}\right)}$$

Критичну глибину зовнішньої поперечної кільцевої тріщини a_c визначали із залежності (9) за умови $K_I = K_{Jc}$, враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу БК:

$$a_c = \frac{K_{Jc} \cdot Y}{\pi \cdot \sigma^2 \cdot F^2}, (10)$$

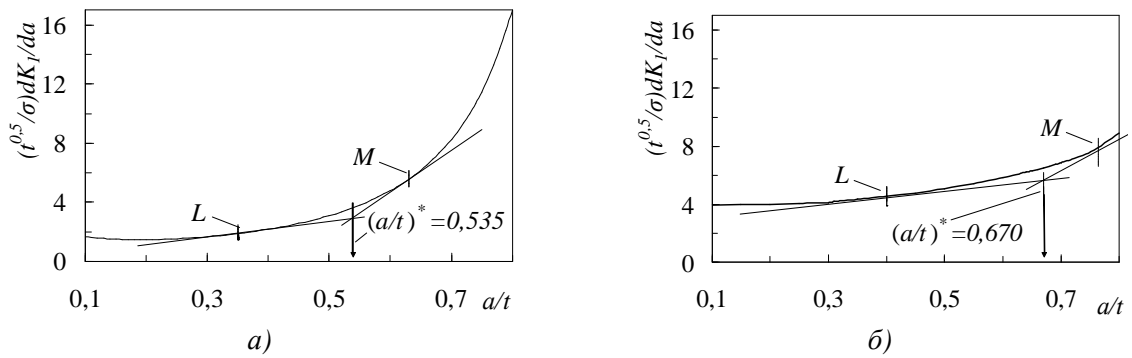


Рисунок 5 – Оцінка характерної глибини $(a/t)^*$ зовнішньої (а) та внутрішньої (б) поперечних кільцевих тріщин у стінці резервної та експлуатованої бурильних труб групи міцності “Л” за осьовим навантаженням

де $\sigma = \frac{Q}{S_f^*}$, S_f^* – площа руйнування.

Для визначення характеристичної глибини втомної тріщини $(a/t)^*$, при якій різко зростає швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , використовували залежність [23] –

$$\frac{dK}{da} = 0,5 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \frac{F}{\sqrt{Y}} + \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Y}} \cdot \frac{dF}{da} - 0,5 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \frac{F}{Y^{1,5}} \cdot \frac{dY}{da}, \quad (11)$$

де
$$\frac{dF}{da} = \frac{2 \cdot (R_{ia} - 1) \cdot \left[\frac{a \cdot (R_{ia} - 1)}{t} + 1 \right] \cdot (R_{ia}^2 - 1)}{t \cdot \left\{ \left[1 - (1 - R_{ia}) \cdot \frac{a}{t} \right]^2 - R_{ia}^2 \right\}};$$

$$\frac{dH}{da} = 1,08 \cdot \frac{R_{ia}}{t \cdot (1 - R_{ia}) \cdot \left(1 - \frac{a}{t} \right)^2};$$

$$\frac{dY}{da} = \frac{(1 - R_{ia})}{t \cdot \left[1 - (1 - R_{ia}) \cdot \frac{a}{t} \right]} \times \left\{ H + a \cdot \frac{dH}{da} + \frac{H \cdot a \cdot (1 - R_{ia})}{t \cdot \left[1 - (1 - R_{ia}) \cdot \frac{a}{t} \right]} \right\}.$$

Розглядали випадок руйнування резервної ($D = 126$ мм, $t = 9,0$ мм) та експлуатованої ($D = 126$ мм, $t = 8,0$ мм) БТ груп міцності “Л”. Для цього випадку за методикою [22] будували безрозмірну залежність $\sqrt{t} \frac{dK_I}{\sigma da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$ та визначали місце різкого зростання швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I під час СПО БК. При цьому, встановивши координати точок L та M (рис. 5, а), визначали відносну глибину характерного дефек-

ту, яка для розглядуваного випадку становила $(a/t)^* = 0,535$.

Використовуючи залежність (10), встановили взаємозв'язок (рис. 6) між критичною глибиною зовнішньої поперечної кільцевої втомної тріщини a_c/t та динамічним зусиллям F , що залежить від довжини БК (рис. 3), враховуючи особливості руйнування металу (табл. 2) досліджуваних БТ групи міцності “Л”.

Представлені графічно (рис. 6) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для резервної БТ ($t = 9,0$ мм) групи міцності “Л” під час опускання на глибині від 2,9 км до 5,0 км ($1,2$ МН $\leq F \leq 2,3$ МН) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $3,2$ мм $\leq a_c \leq 4,8$ мм (рис. 6, крива 1, ділянка I ($C'A'$)), тоді як на глибинах опускання від 0,4 км до 2,9 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 4,8$ мм (рис. 6, ділянка II (BC')).

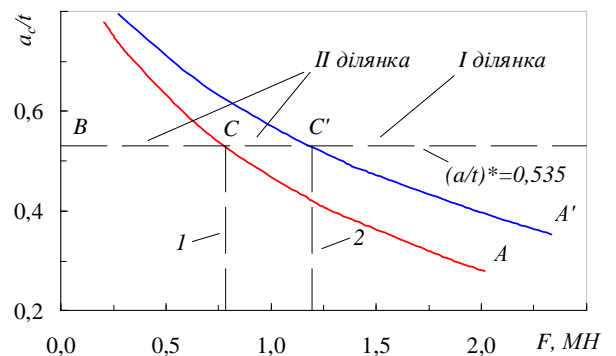


Рисунок 6 – Взаємозв'язок критичної (a_c/t) глибини зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці експлуатованої (1) та резервної (2) БТ групи міцності “Л” та зусилля пружного зв'язку (F) при СПО

Для металу експлуатованої БТ ($t = 8,0$ мм) групи міцності “Л” під час опускання на глибинах від 1,7 км до 5,0 км ($0,79$ МН $\leq F \leq 2,0$ МН) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $2,2$ мм $\leq a_c \leq 4,3$ мм

(рис. 6, крива 2, ділянка I (CA)), тоді як на глибинах від 0,4 км до 1,7 км небезпечними є вторинні тріщини глибиною $a^*=4,3$ мм (рис. 6, ділянка II (BC)).

Оцінка умов руйнування бурильних труби із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною, що перебуває під дією осевого навантаження

Для визначення умов, за яких можливе руйнування при опусканні досліджуваних БТ групи міцності “Л”, що містять внутрішню поперечну кільцеву тріщину (рис. 4, б) глибиною $(a/t)^*$, використовували залежність [23], що визначає величину коефіцієнта інтенсивності напружень K_I у вершині такої тріщини

$$K_I = \sigma \cdot \frac{F}{\sqrt{1-\frac{a}{t}}} \mp \sqrt{\pi \cdot a} \quad (12)$$

При цьому швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I рівна

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \sigma \cdot \frac{dF}{da} \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{1-\frac{a}{t}}} + \frac{\sigma \cdot F}{2 \cdot t} \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\left(1-\frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma \cdot F}{\sqrt{1-\frac{a}{t}}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad (13)$$

де функція F та швидкість її зміни dF/da визначаються функціональними рядами, які залежать від співвідношення R_i/R_a [23] ($R_a = R_i + a$).

Визначали характеристичну глибину внутрішньої поперечної кільцевої тріщини $(a/t)^*$ для досліджуваних фрагментів резервних ($t = 9,0$ мм) та експлуатованих ($t = 8,0$ мм) БТ групи міцності “Л”. Для цього була побудована безрозмірна залежність типу $\frac{\sqrt{t} dK_I}{\sigma da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$

(рис. 5, б) та визначено місце із різким зростанням швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I під час опускання БТ. Визначена за методикою [22] характеристична глибина внутрішньої поперечної вторинної тріщини для досліджуваної резервної БТ ($t = 9,0$ мм) групи міцності “Л” рівна $a^* = 6,0$ мм, а експлуатованої БТ ($t = 8,0$ мм) цієї ж групи міцності рівна $a^* = 5,4$ мм.

Встановили взаємозв’язок (рис. 7) між критичними глибинами внутрішньої поперечної вторинної тріщини a_c/t для досліджуваних БТ та динамічним зусиллям F , яке, у свою чергу пов’язане із глибиною свердловини (рис. 3).

Результати обчислень (рис. 7) дають підстави зробити висновок, що під час опускання для резервної БТ груп міцності “Л” на глибинах від 1,2 км до 5 км ($0,56 \text{ МН} \leq F \leq 2,3 \text{ МН}$) критичними для металу БТ є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $3,0 \text{ мм} \leq a_c \leq 6,0 \text{ мм}$ (рис. 7, крива I (C’A’), ділянка I), тоді як на глибинах від 0,4 км до глибини 1,2 км для резервної БТ групи міцності “Л” небезпечними є внутрішні поперечні кільцеві тріщини довжиною $a^* = 6,0$ мм (рис. 7, ділянка II (BC’)).

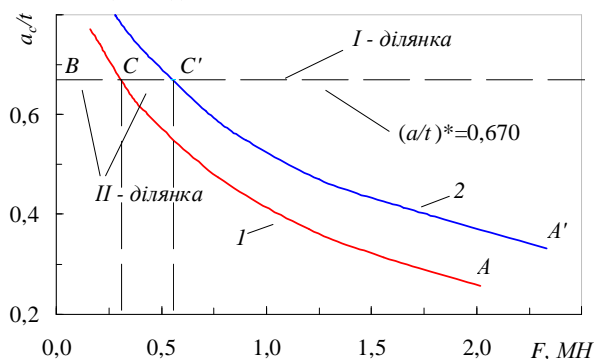


Рисунок 7 – Взаємозв’язок критичної (a_c/t) глибини та внутрішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці експлуатованої (1) та резервної (2) БТ групи міцності “Л” та зусилля пружного зв’язку (F) при СПО

Для експлуатованої БТ групи міцності “Л” на глибинах від 0,5 км до 5,0 км ($0,31 \text{ МН} \leq F \leq 2,0 \text{ МН}$) критичними для металу БТ є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $2,0 \text{ мм} \leq a_c \leq 5,4 \text{ мм}$ (рис. 7, крива 2 (CA), ділянка I), а для експлуатованої БТ цієї ж групи міцності на глибинах від 0,4 км до 0,5 км небезпечними є внутрішні поперечні кільцеві тріщини глибиною $a^* = 5,4$ мм (рис. 7, ділянка II, (BC’)).

Результати розрахунково-експериментальних досліджень та їх обговорення

Одержані результати дозволяють інтерпретувати суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колон при СПО, описаних в роботах [1-9].

Аналіз результатів проведених розрахунково-експериментальних досліджень свідчить, що для оцінки умов руйнування резервних та тривало експлуатованих БТ групи міцності “Л”, що містять поперечні кільцеві тріщини, необхідно враховувати:

- вплив динамічних навантажень;
- тривалість експлуатації БТ, тобто відповідний їй ступінь деградації металу;
- розміщення поперечної кільцевої тріщини (зовнішня чи внутрішня);
- на малих глибинах буріння показник “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”.

Аналіз відображених на рис. 3 результатів обчислень динамічних зусиль при СПО засвідчує, що на глибинах понад 3,5 км для труб запасу і 3,7 км для БТ експлуатованих 23 роки необхідно враховувати динамічні зусилля при опусканні на етапі їх гальмування. На менших глибинах необхідно враховувати динамічні зусилля, що діють при підйманні розглядуваних колон БТ із врахуванням оптимальних швидкостей підйому БК (див. табл. 1).

Зауважимо, що величина критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} як характеристики силового критерію руйнування металу труб БК залежить від тривалості експлуатації і зменшується із збільшенням тривалості їх експлуатації. У зв'язку з цим змінюється глибина СПО, при якій необхідно враховувати величину критичного K_{Jc} , – I ділянка (СА та С' А') на рис. 6 та рис. 7. Так, для труб запасу, які містять зовнішню кільцеву тріщину, вона становить 2,4 км, а для експлуатованих БТ вона зменшується до 1,5 км. Для труб запасу, які містять внутрішню кільцеву тріщину, вона становить 0,85 км, а для експлуатованих БТ зменшується до 0,6 км.

Таким чином, визначальним чинником, що призводить до суттєвого збільшення кількості аварій БК із зовнішніми поперечними кільцевими тріщинами під час опускання експлуатованих впродовж 23 роки БТ та резервних труб на глибинах в інтервалі понад 1,5 км – 2,4 км, а для аналогічних труб БК, що містять внутрішні поперечні кільцеві тріщини під час СПО на глибинах в інтервалі 0,6 км – 0,85 км, є втрата металом БТ опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості.

Причому (див. табл. 3 та табл. 4) більш небезпечними для резервних труб БК на глибинах до 1,7 км є зовнішні кільцеві тріщини, тоді як внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними в інтервалі глибин від 1,7 км до 5 км. Для експлуатованих впродовж 23 років труб БК більшу небезпеку складають кільцеві зовнішні тріщини на глибинах до 1,1 км, тоді як внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними в інтервалі глибин від 1,1 км до 5 км.

Отже, із збільшенням тривалості експлуатації та зменшенням товщини стінки БТ внутрішні кільцеві тріщини стають більш небезпечними при бурінні свердловин на глибинах понад 1 км.

Слід зауважити, що визначальним чинником, який обумовлює переважаючий вплив зовнішніх кільцевих тріщин на малих глибинах (до 1,7 км для резервних труб БК та до 1,1 км експлуатованих впродовж 23 років труб БК), є характеристична глибина втомної тріщини a^* , тоді як на більших глибинах визначальним чинником, який обґрунтовує умови руйнування БК при СПО, є величина критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} .

Таблиця 3 – Значення глибини критичних a_c (характеристичних a^*) зовнішніх поперечних кільцевих тріщин для бурильних труб групи міцності “Л”

Критична зовнішня поперечна кільцева тріщина a_c (a^*), мм			
L, км	Напрямок руху БК	Враховує динамічну силу пружного зв'язку F	
		резерв.	експл.
0,4	↑р	7,0 (4,8)	5,9 (4,3)
1,0	↑р	6,0 (4,8)	4,8 (4,3)
1,5	↑р	5,5 (4,8)	4,3 (4,3)
2,0	↑р	5,0 (4,8)	3,8
2,4	↑р	4,8 (4,8)	3,6
3,0	↑р	4,6	3,4
3,5	↑р	4,2	-
3,7	↓s	-	3,0
4,0	↓s	3,8	2,8
5,0	↓s	3,2	2,2

Таблиця 4 – Значення глибини критичних a_c (характеристичних a^*) внутрішніх поперечних кільцевих тріщин для бурильних труб групи міцності “Л”

Критична зовнішня поперечна кільцева тріщина a_c (a^*), мм			
L, км	Напрямок руху БК	Враховує динамічну силу пружного зв'язку F	
		резерв.	експл.
0,4	↑р	7,0 (6,0)	5,8 (5,4)
0,6	↑р	6,5 (6,0)	5,4 (5,4)
0,85	↑р	6,0 (6,0)	4,95
1,0	↑р	5,55	4,6
1,1	↑р	5,4	4,3
1,4	↑р	5,0	3,8
1,7	↑р	4,8	3,6
2,0	↑р	4,6	3,4
3,0	↑р	4,2	3,0
3,5	↑р	3,9	-
3,7	↓s	-	2,7
4,0	↓s	3,7	2,5
5,0	↓s	3,0	2,0

Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінювання умов критичного руйнування під час СПО тривало експлуатованих бурильних труб, що містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину.

2. Здійснено експериментальне оцінювання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} металу резервних та тривало експлуатованих бурильних труб для груп міцності “Л”.

3. Встановлено, що руйнування резервних бурильних труб групи міцності “Л” із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах понад 2,4 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,4 км до 2,4 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”. Тоді як для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах від 0,85 км до 5 км, вона визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,4 км до 0,85 км – показником “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”.

4. Показано, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб групи міцності “Л” із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах понад 1,5 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,4 км до 1,5 км – показником “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”. Для аналогічних бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах від 0,6 км до 5 км, вона визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,4 км до 0,6 км – показником “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”.

5. Оцінка впливу динамічних навантажень під час СПО засвідчує те, що динамічні навантаження при опусканні колони БТ ($t = 9$ мм) є більш небезпечні на глибинах понад 3,5 км, а при опусканні колони БТ ($t = 8$ мм) – на глибинах понад 3,7 км. На менших глибинах відповідно більш небезпечні є динамічні навантаження при підйманні досліджуваних колон БТ.

6. Встановлено, що зовнішні поперечні кільцеві тріщини при СПО резервних бурильних труб групи міцності “Л” на глибинах до 1,7 км є небезпечнішими за внутрішні, які є більш небезпечними в інтервалі глибин від 1,7 км до 5,0 км.

7. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини під час СПО тривало експлуатованих бурильних труб групи міцності “Л” на глибинах понад 1,1 км є більш небезпечними, ніж зовнішні, в той час як на глибинах до 1,1 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

8. Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації результатів технічного діагностування як тривало експлуатованих, так і мало експлуатованих бурильних труб.

Література

1 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. В. В. Панасюка. – Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є. І. Крижанівський, В. М. Івасів [та ін.] – Львів - Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2006. – 1193 с.

2 Артим В. І. Аналіз корозійно-втомних руйнувань елементів бурильної колони / В. І. Артим, І. І. Яциняк, В. В. Гриців [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 2 (43). – С. 197-202.

3 Івасів В. М. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / В. М. Івасів, Я. С. Гридзук, Л. Р. Юрич // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 6/4 (20). – С. 15-17.

4 Macdonald, K. A. Failure Analysis of Drillstrings / K. A. Macdonald, J. V. Bjune // Engineering Failure Analysis. – 2007. – Vol. 14, Is. 8. – P 1641-1666. – dx. doi: 10.1016/j.engfailanal.2011.03.014.

5 Wang, Rui-he Drillstring failure analysis and its prevention in northeast Sichuan, China / Rui-he Wang, Yan-bin Zang, Rui Zhang, Yu-huan Bu, Hua-zhou Li // Engineering Failure Analysis. – 2011. – Vol. 18, Is. 4. – P 1233-1241. – doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.03.005

6 Zamani, S. M. Failure Analysis of Drill Pipe: A Review / S.M. Zamani, S.A. Hassanzadeh-Tabrizi, H. Sharifi // Engineering Failure Analysis. – Jan 2016. – Vol. 59, Is. 1. – P 605-623. – doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.012.

6 Fangpo, Li. Failure analysis of J127mm IEU G105 drill pipe wash out / Li Fangpo, Liu Yonggang, Wang Xinhui, Lu Caihong // Engineering Failure Analysis. – 2011. – Vol. 18, Is. 7. – P. 1867–1872. – doi:10.1016/j.engfailanal.2011.06.018

7 Macdonald, K. A. Failure analysis of drillstring and bottom hole assembly components / K. A. Macdonald // Engineering Failure Analysis. – 1994. – Vol. 1, Is. 2. – P 91-117. – doi.org/10.1016/1350-6307(94)90010-8.

8 Vaisberg, O. Fatigue of Drillstring: State of the Art / O. Vaisberg, O. Vincke, G. Perrin, J. P. Sarda, J. B. Fay // Oil & Gas Science and Technology. – 2002. – Vol. 57, № 1. – P. 7-37. doi:10.2516/ogst:2002002

9 Крыжановский Е. И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин: дисс. докт. тех. наук. – М., 1990. – 480 с.

10 Інформаційний бюлетень про аварії, ускладнення і брак в роботі під час буріння свердловин в БУ “УКРБУРГАЗ” за 2015 рік.

11 Інформаційний бюлетень про аварії, ускладнення і брак в роботі під час буріння свердловин в БУ “УКРБУРГАЗ” за 2016 рік.

12 Витязь О. Ю. Вплив тривалості експлуатації на результати оцінювання умов руйнування труб бурильних колон під час спуско-підймальних операцій / О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський, В. В. Тирлич // Нафтогазова енергетика – 2017. – №. 1 (27). – С. 7-14.

13 Витязь О. Ю. Експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон при спуско-підймальних операціях/ О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський // Вісник НТУ «ХПІ» . – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – №7 (1229). – С. 30-38. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.05

14 Малько Б. Д. Розгін талевого блоку з колоною труб при підйманні / Б. Д. Малько // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтопромислове обладнання. – 1996. – № 33. – С. 91-96.

15 Малько Б. Д. Рівняння руху колони труб при спуску в свердловину / Б. Д. Малько, Я. І. Козак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 2 (3). – С. 71-73.

16 Баграмов Р. А. Буровые машины и комплексы / Р. А. Баграмов. – М.: Недра, 1988. – 501 с.

17 Бержец Г. Н. Основы классификации и расчеты параметров буровых установок / Г. Н. Бержец. – М.: Недра, 1988. – 256 с.

18 Харченко Є. В. Динамічні процеси бурових установок / Є. В. Харченко. – Львів: Світ, 1991. – 176 с.

19 Юртаев В. Г. Динамика буровых установок / В. Г. Юртаев. – М.: Недра, 1987. – 155 с.

20 Малько Б. Д. Коефіцієнт динамічності підймального комплексу бурової установки / Б. Д. Малько, В. М. Івасів., Я. І. Козак, М. М. Фернюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Буріння нафтових і газових свердловин. – 1998. – №35 (том 2). – С. 122-131.

21 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 316 с.

22 Harris D. O. Stress Intensity Factor for Hollow Circumferentially Notched Round Bars / D. O. Harris // Trans. ASME: J. of Basic Engineering. – 1967. – Vol. **89**, Is. 1. – P. 49-54. – doi:10.1115/1.3609569

*Стаття надійшла до редакційної колегії
16.02.18*

*Рекомендована до друку
професором **Мойсишиним В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Сиротюком А.М.**
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України, м. Львів)*