

# Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 620.191.33:620.194.8

## ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПІД ЧАС СПУСКО-ПІДІЙМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

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

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 242353,  
e-mail: o.vytyaz@gmail.com

Здійснено експериментальну оцінку силового критерію руйнування металу резервних та тривало експлуатованих бурильних труб. Визначено умови, за яких під час спуско-підіймальних операцій можливе руйнування досліджуваних бурильних труб, що містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину. Встановлено взаємозв'язок між виникненням критичних зовнішньої або внутрішньої поперечних кільцевих тріщин у бурильних трубах та вагою бурильної колони. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини під час спуско-підіймальних операцій бурильних колон на глибинах понад 2 км є більш небезпечними, ніж зовнішні, тоді як в інтервалі глибин від 0,5 км до 2 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.

Проведена експериментальная оценка силового критерия разрушения металла резервных и длительно эксплуатированных бурильных труб. Определены условия, при которых при спуско-подъемных операциях возможно разрушение исследуемых бурильных труб, содержащих внешнюю или внутреннюю поперечную кольцевую трещину. Установлена взаимосвязь между возникновением критических внешних или внутренних поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и весом бурильной колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при спуско-подъемных операциях бурильных колонн на глубинах свыше 2 км являются более опасными, чем внешние, в то время как в интервале глубин от 0,5 км до 2 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.

An experimental assessment of the force criterion for metal failure of non-operating and long-term operated drill pipes has been carried out. The conditions, under which during tripping the failure of investigated drill pipes containing an external or internal circumferential transverse crack is possible, have been defined. The interrelation between the critical external or internal circumferential transverse cracks in drill pipes and the drilling string weight has been established. It has been shown that internal circumferential transverse cracks during drilling string tripping at depths exceeding 2 km are more dangerous than the external ones, whereas in the depth interval from 0.5 km to 2 km external transverse circumferential cracks are more dangerous.

Key words: critical stress intensity factor, critical size of the external or internal transverse circumferential crack, typical depth of external or internal transverse circumferential crack.

### Вступ

В Україні річний видобуток нафти становить 10-12%, а природного газу – 46-48% від загальнодержавних потреб [1]. На сьогодні од-

ним із перспективних напрямів вирішення проблеми забезпечення України власними енергоресурсами є глибинне буріння. Величезні запаси нафти і газу розвідані на території Дніпро-Донецької западини і Карпатської нафто-

газової провінції на глибині орієнтовно 6,5-7 тисяч метрів. В Полтавській області пробурено декілька надглибоких свердловин глибиною понад 6,5 та 5,5 тис. м, дебіт яких підтверджує значні запаси газу на цій глибині. Однак, буріння на таких глибинах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій, пов'язаних із виходом з ладу елементів бурильних колон. Так, в інтервалі буріння 2500-4500 м кількість відмов зростає у 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 м – в 9,8 рази [2].

При роторному бурінні, на елементи бурильних колон діють втомні навантаження та промивальна рідина, які стають причиною зародження та розвитку тріщин [2-6]. Причому на великих глибинах руйнування труб визначається домінуючим впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають у процесі буріння та спуско-підйомних операцій (СПО), які зумовлюють розвиток у місцях пошкоджень тріщин у поперечному перерізі тіла труби. Тривалість СПО у процесі буріння глибоких свердловин складає до 60 % від загального виробничого часу. Із збільшенням глибини свердловини різко зростає об'єм СПО. За весь період буріння свердловини глибиною 4500-5000 м опускається і підіймається 50000-80000 свічок [2].

Тому актуальним науково-прикладним завданням є розрахунково-експериментальна оцінка умов, при яких потенційно можливе поперечне руйнування труб бурильної колони, спричинене впливом двох факторів: глибини буріння та деградацією металу тривало експлуатованих бурильних труб.

Метою даної роботи є оцінювання впливу глибини буріння та деградації властивостей металу бурильних труб, що містять зовнішні або внутрішні кільцеві тріщини, на умови їх руйнування під час СПО, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

### **Об'єкт та методична процедура досліджень та розрахунків**

Відомо, що причиною руйнування в окремих випадках [2-9] є утворення на зовнішній або внутрішній поверхні як бурильної труби, так і елементів їх різьбових з'єднань корозійно-втомних тріщин. Згідно з даними діагностичного контролю такі тріщини зароджуються на дні корозійних виразок, технологічних рисок, біля концентраторів напружень (наприклад, впадина першого витка як зовнішньої, так і внутрішньої різьби замкового з'єднання) або в зоні термічного впливу бурильних труб із привареними замками. Спочатку вони набувають півеліптичної форми ( $a/c$ ) з розмірами півосей  $a$  та  $c$ , однак, розвиваючись в процесі експлуатації, утворюють поперечні кільцеві тріщини з відносною глибиною ( $a/t$ ), де  $t$  – товщина стінки бурильної труби.

Для адекватної оцінки умов руйнування бурової колони при СПО необхідно одержати

експериментальні дані, які б відображали умови руйнування металу бурильних труб. Крім того, застосувати відповідну розрахункову схему [11], яка описує умови, за яких можливе руйнування бурильної колони. Необхідно також врахувати вагу інструмента (долота) та бурильної колони, до складу якої входять ведуча труба (квадратна штанга), бурильні труби, бурильні замки, муфти, перевідники, центратори бурильної колони та обваженні бурильні труби (ОБТ).

Руйнування металу бурильних колон оцінювали за енергетичним [12] критерієм: тріщина починає поширюватись, якщо інтенсивність енергії  $J$ , що вивільнилася, сягає критичної величини  $J_c$ .

$$J_* = J_c. \quad (1)$$

Критичну тріщиностійкість  $J_c$  металу бурильних колон визначали за методикою [13] на основі експериментально одержаної діаграми руйнування зразків “зусилля-прогин”. Значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  обчислювали, використовуючи співвідношення [14]

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1 - \mu^2)}}, \quad (2)$$

де  $J_{Jc}$  – критична тріщиностійкість;

$E$  – модуль Юнга ( $E = 10^{11}$  Па);

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей  $\mu = 0,3$ ).

Оцінку умов руйнування елементів бурильних колон, що містять зовнішню або внутрішню кільцеву тріщину і перебувають під дією осьового навантаження, здійснювали, використовуючи відповідні аналітичні залежності [9] для визначення параметрів коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_I$  та швидкості їх зміни ( $dK_I/da$ ). При цьому визначали показник “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”, тобто глибину тріщини ( $a/t$ )\*, при якій різко зростає швидкість ( $dK_I/da$ ) зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  [9]. Величина ( $a/t$ )\* є характерним параметром, під час досягнення якого різко зростає ймовірність її руйнування. Згідно з методикою [9] для його визначення була побудована безрозмірна залежність типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (3)$$

де  $\sigma$  – прикладене зовнішнє навантаження,

$t$  – товщина елемента конструкції у місці руйнування.

З кроком  $a/t = 0,01$  підраховували поточні значення  $dK_I/da = F(a/t)$  (рис. 1) та визначали три точки, в околі яких виконувались умови:

$$(dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 0,01 \rightarrow (a/t)_1 \rightarrow 1;$$

$$(dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 0,10 \rightarrow (a/t)_2 \rightarrow 2;$$

$$(dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 1,00 \rightarrow (a/t)_3 \rightarrow 3.$$

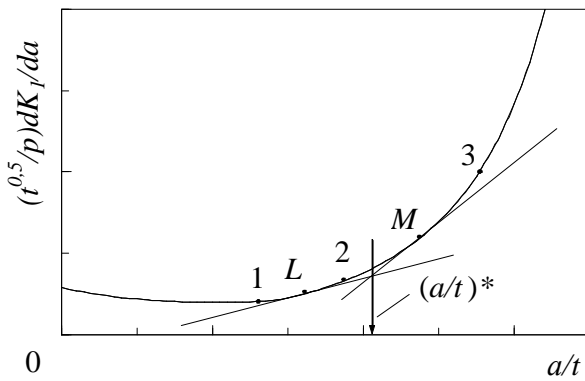


Рисунок 1 – Загальна схема визначення характеристичної глибини поперечної кільцевої тріщини  $(a/t)^*$  [9]

За аргументами цих точок визначали координати точок  $L (0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2], (dK/da)_L)$  та  $M (0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3], (dK/da)_M)$ . З визначених точок  $L$  і  $M$  (див. рис. 1) проводили дотичні. Аргументом точки перетину цих дотичних є значення глибини характерного дефекту  $(a/t)^*$ , при якому різко зростає швидкість зміни  $(dK_1/da)$  коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_1$ .

Одержані розрахункові дані порівнювали із результатами розрахунково-експериментальних випробувань оцінки руйнування експлуатованого металу труб бурильної колони. Причому основними параметрами, за якими визначають умови руйнування елементів бурильної колони, є:

– глибина наявної в бурильній трубі внутрішньої або зовнішньої кільцевої поперечної тріщини  $a_c$ ;

– вага бурильної колони  $Q$ .

Вагу бурильної колони визначали із співвідношення [15]

$$Q_i = k \cdot \delta \cdot (Q_d + Q_{тб} + Q_{обт} L_{обт} + Q_{от} L_{от}) \cdot \left(1 - \frac{\rho_{бр}}{\rho_m}\right) \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує сили тертя колони бурильних труб до стінки свердловини, ( $k = 1,5 \div 2,0$ );

$\delta$  – коефіцієнт, який враховує збільшення ваги труб за рахунок ваги з'єднуючих елементів (для муфтово-замкового з'єднання  $\delta = 1,1$ );

$Q_d$  – вага долота, (долото ДРС 214,3-М1 –  $Q_d = 651 H$ );

$Q_{тб}$  – вага турбобура, (турбобур А7ГТШ –  $Q_{тб} = 44250 H$ );

$Q_{обт}$  – вага 1 м ОБТ, ( $Q_{обт} = 1631 H$ );

$Q_{от}$  – вага 1 м ТБПВ, ( $127 \times 9 - Q_{от} = 257 H$ ,  $127 \times 8 - Q_{от} = 230,5 H$ );

$L_{обт}$  – довжина ОБТ, м;

$L_{от}$  – довжина бурильної труби, м;

$\rho_{бр}$  – питома вага бурового розчину, ( $\rho_{бр} = 1240 \text{ кг/м}^3$ );

$\rho_m$  – питома вага матеріалу бурильних труб, ( $\rho_m = 7850 \text{ кг/м}^3$ ).

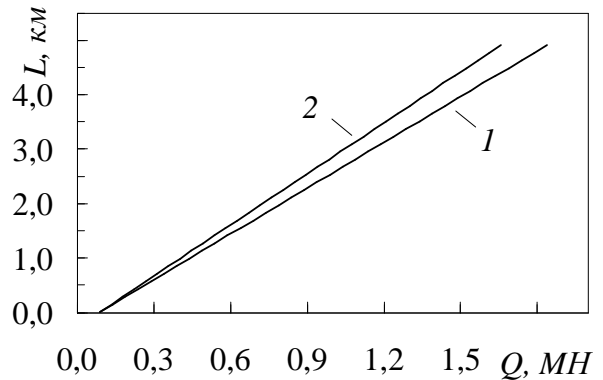


Рисунок 2 – Взаємозв'язок довжини  $(L)$  резервної (1) та експлуатованої (2) бурильних колон з її вагою  $(Q)$

### Результати досліджень та їх обговорення

Розглянемо випадки руйнування бурильних труб, котрі містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину, що перебувають під дією осьового навантаження.

Матеріалом дослідження були фрагменти неексплуатованої або нетривало експлуатованої (надалі – резервної) і експлуатованої (23 роки) бурильних труб ТБПВ з умовним діаметром 127 мм групи міцності “Л”.

Механічні характеристики резервної та тривало експлуатованої (23 роки) бурильних труб, виготовлених із сталі 36Г2С, визначались за стандартною процедурою [16] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг. Їх значення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Механічні характеристики резервної (1) та тривало експлуатованої (2) бурильних труб (сталь 36Г2С)

№	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1	623,5	545,4	20,3	57,4
2	790,0	605,0	12,5	27,0

Хімічний склад досліджуваних сталей зведено в табл. 2.

Для експериментального визначення величини  $J_{Ic}$  вирізали по п'ять зразків з фрагменту резервної бурильної труби групи міцності “Л” розміром  $200,0 \times 10,0 \times 9,0$  мм та з фрагменту тривало експлуатованої бурильної труби групи міцності “Л” розміром  $200,0 \times 10,0 \times 8,0$  мм. При цьому оцінювали роботу  $A$  (рис. 4), витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною  $l_{сер}$  (рис. 3, а) як елемента конструкції, при якій він втрачає свої несівні властивості,

Таблиця 2 – Хімічний склад досліджуваних сталей бурильних труб

Сталь 36Г2С (резервна)								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
0,36	1,68	1,02	0,12	0,09	0,22	0,08	0,014	0,012
Сталь 36Г2С (експлуатована)								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
0,38	1,52	0,92	0,09	0,13	0,04	0,09	0,018	0,016

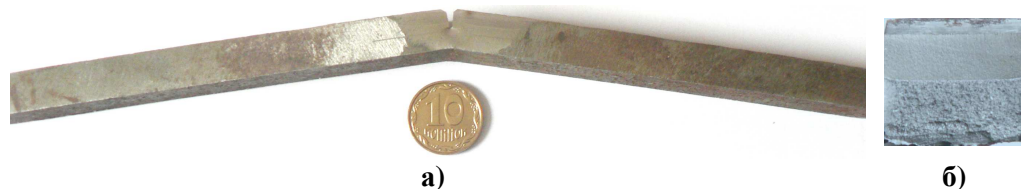


Рисунок 3 – Загальний вигляд зразка (а) та площі деформованої поверхні зразка (б) після експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованої бурильної труби

Таблиця 3 – Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_{Jc}$

Труба	Група міцності	Термін експлуатації, роки	$K_{Jc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$					$K_{Jc}^{cep}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
			1	2	3	4	5	
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

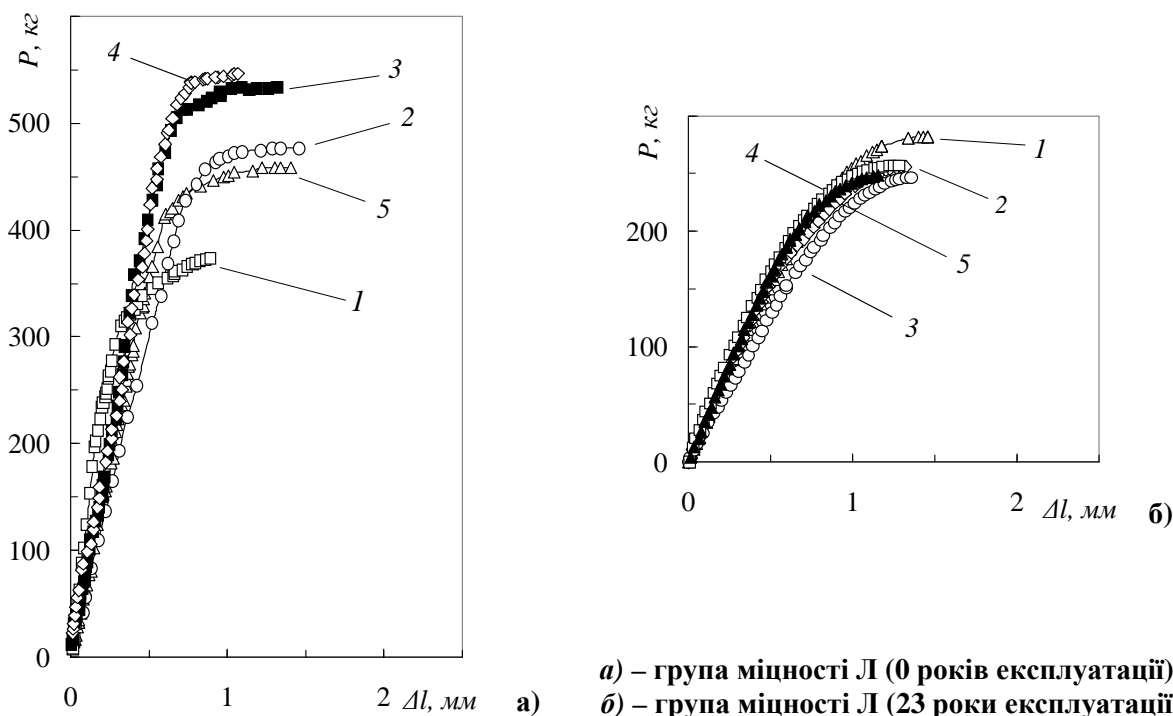


Рисунок 4 – Діаграма деформування  $P - \Delta l$  зразків з фрагментів бурильних труб

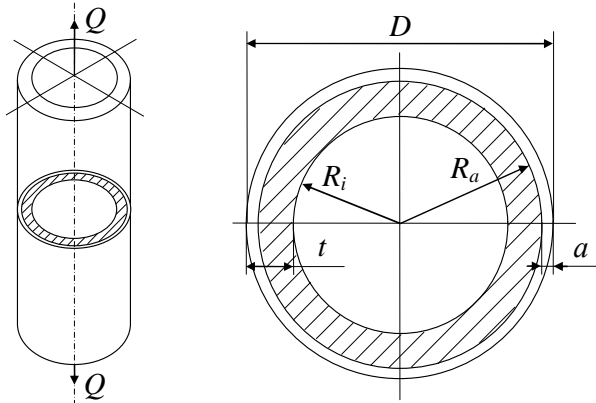
віднесено до нетто площі деформованої поверхні зразка  $S_f$  (рис. 3, б)

$$J_{Ic} = \frac{A}{S_f} \quad (6)$$

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі подавали як критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Jc}$ , який обчислювали за допомогою рівняння (2).

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

Для визначення умов, за яких можливе руйнування при спуско-підймальних операціях досліджуваних бурильних труб груп міцності "Л", що містять зовнішню поперечну кільцеву тріщину глибиною  $(a/t)$ , розглядали розрахункову схему, зображену на рис. 5.



**Рисунок 5 – Пустотілий циліндр із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осевого навантаження [10]**

При підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  вздовж фронту зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (рис. 4) використовували залежність [10]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{\sqrt{Y}}, \quad (7)$$

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

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

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

Критичну глибину зовнішньої поперечної кільцевої тріщини  $a_c$  визначали із залежності (7) за умови  $K_I = K_{Jc}$ , враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурильної колони ( $Q$ )

$$a_c = \frac{K_{Jc} Y}{\pi \sigma^2 F^2}, \quad (8)$$

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 [10]

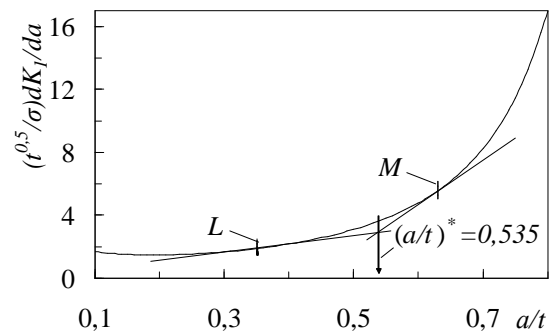
$$\frac{dK}{da} = 0,5\sigma \sqrt{\frac{\pi}{a}} \frac{F}{\sqrt{Y}} + \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Y}} \frac{dF}{da} - 0,5\sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{Y^{1,5}} \frac{dY}{da}, \quad (9)$$

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

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

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

Розглядали випадок руйнування резервної  $D = 126$  мм,  $t = 9,0$  мм та експлуатованої  $D = 126$  мм,  $t = 8,0$  мм бурильних труб груп міцності "Л". Для цих випадків була побудована відповідна безрозмірна залежність типу 3 (рис. 6). За цією залежністю визначали відносну глибину характерного дефекту, яка для випадків, що розглядаються, практично збігається і становить  $(a/t)^* = 0,535$ .



**Рисунок 6 – Оцінювання характерної глибини  $(a/t)^*$  зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці резервної та експлуатованої бурильних труб групи міцності "Л" за осевим навантаженням**

Використовуючи залежність (8), встановили взаємозв'язок між критичною глибиною зовнішньої поперечної кільцевої втомної тріщини  $a_c/t$  та вагою бурильної колони  $Q$  (рис. 2), що залежить від глибини свердловини, враховуючи особливості руйнування металу (рис. 4) досліджуваних бурильних труб групи міцності "Л".

Представлені графічно (рис. 7) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для нового металу бурильної труби групи міцності "Л" під час спуско-підймальних операцій на глибині від 3,1 км до 5,0 км ( $1,18 \text{ МН} \leq Q \leq 1,8 \text{ МН}$ ) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні

$4,2 \text{ мм} \leq a_c \leq 4,8 \text{ мм}$  (рис. 7, крива 1, ділянка I ( $C' A'$ )), тоді як на глибинах від 0,5 км до 3,1 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 4,8 \text{ мм}$  (рис. 7, ділянка II ( $BC'$ )). Для металу експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" під час спуско-підйомальних операцій на глибинах від 2,2 км до 5,0 км ( $0,79 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$ ) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні  $2,7 \text{ мм} \leq a_c \leq 4,3 \text{ мм}$  (рис. 7, крива 2, ділянка I ( $CA$ )), тоді як на глибинах від 0,5 км до 2,2 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 4,3 \text{ мм}$  (рис. 7, ділянка II ( $BC$ )).

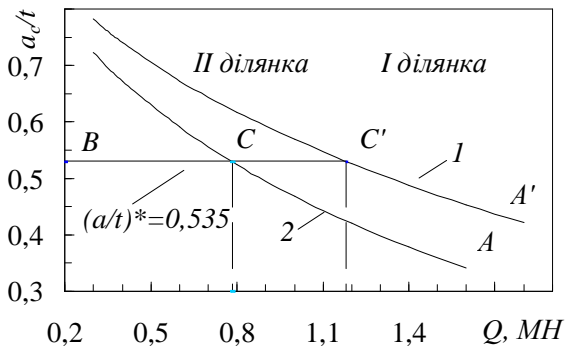


Рисунок 7 – Взаємозв’язок критичної ( $(a_c/t)$ ) глибини зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці резервної (1) та експлуатованої (2) бурильних труб групи міцності "Л" та ваги бурильної колони ( $Q$ )

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

Для визначення умов, за яких можливе руйнування при спуско-підйомальних операціях досліджуваних бурильних труб групи міцності "Л", що містять внутрішню поперечну кільцеву тріщину (рис. 8) глибиною  $(a/t)^*$ , використовували залежність [10], що визначає величину коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  у вершині такої тріщини

$$K_I = \sigma \frac{F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

При цьому швидкість зміни  $(dK_I/da)$  коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  рівна  $\frac{dK_{Ia}}{da} = \sigma \frac{dF}{da} \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} + \frac{\sigma F}{2t} \frac{\sqrt{\pi a}}{\left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \frac{\sigma F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$ , (11)

де функція  $F$  та швидкість її зміни  $dF/da$  визначаються функціональними рядами, які зале-

жать від співвідношення  $R_i/R_a$  [10] ( $R_a = R_i + a$ ).

Визначали характеристичну глибину внутрішньої поперечної кільцевої тріщини  $(a/t)^*$  для досліджуваних фрагментів резервних та експлуатованих бурильних труб групи міцності "Л" ( $D = 126 \text{ мм}$ ,  $t = 9,0 \text{ мм}$ ) та ( $D = 126 \text{ мм}$ ,  $t = 8,0 \text{ мм}$ ). Для цього була побудована безрозмірна залежність типу  $\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$  (рис. 9) та встановлене місце із різким зростанням швидкості зміни  $(dK_I/da)$  коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  під час спуско-підйомальних операцій бурильних труб. За описаною вище методикою [9] визначали координати точок  $L$  ( $0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2]$ ,  $(dK/da)_L$ ) та  $M$  ( $0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3]$ ,  $(dK/da)_M$ ).

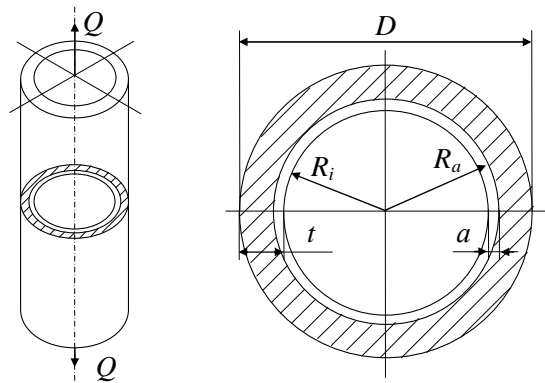


Рисунок 8 – Пустотілий циліндр із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осевого навантаження [10]

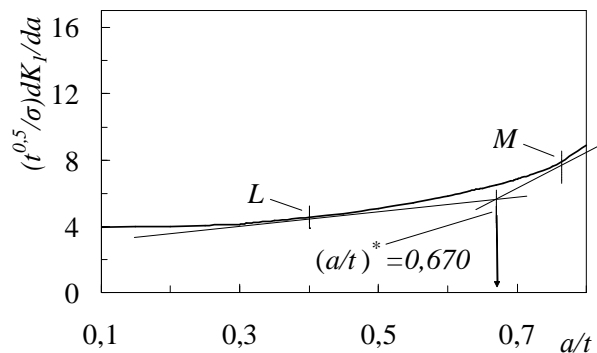


Рисунок 9 – Оцінювання характерної глибини  $(a/t)^*$  внутрішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці резервної та експлуатованої бурильних труб групи міцності "Л" за осевим навантаженням

Характеристична глибина внутрішньої поперечної втомної тріщини для досліджуваної резервної бурильної труби групи міцності "Л" рівна  $a^* = 6,0 \text{ мм}$ , а експлуатованої бурильної труби цієї ж групи міцності рівна  $a^* = 5,4 \text{ мм}$ .

Встановили взаємозв'язок між критичними глибинами внутрішньої поперечної втомної тріщини  $a_c/t$  для досліджуваних бурильних труб та вагою бурильної колони  $Q$ , що визначається глибиною свердловини.

Результати обчислень (рис. 10) дають підстави зробити висновок, що під час спуско-підіймальних операцій для резервної бурильної труби груп міцності "Л" на глибинах від 1,3 км до 5 км ( $0,56 \text{ МН} \leq Q \leq 1,80 \text{ МН}$ ) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні  $3,7 \text{ мм} \leq a_c \leq 6,0 \text{ мм}$  (рис. 10, крива 1 ( $C'A'$ ), ділянка I), а для експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" на глибинах від 0,7 км до 5,0 км ( $0,31 \text{ МН} \leq Q \leq 1,60 \text{ МН}$ ) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні  $2,3 \text{ мм} \leq a_c \leq 5,4 \text{ мм}$  (рис. 10, крива 2 ( $CA$ ), ділянка I). Тоді як на глибинах від 0,5 км до глибини 1,3 км для резервної бурильної труби групи міцності "Л" небезпечними є внутрішні поперечні кільцеві тріщини довжиною  $a^*=6,0 \text{ мм}$  (рис. 10, ділянка II ( $BC'$ )), а для експлуатованої бурильної труби цієї ж групи міцності на глибинах від 0,5 км до 0,7 км небезпечними є внутрішні поперечні кільцеві тріщини глибиною  $a^*=5,4 \text{ мм}$  (рис. 10, ділянка II, ( $BC$ )).

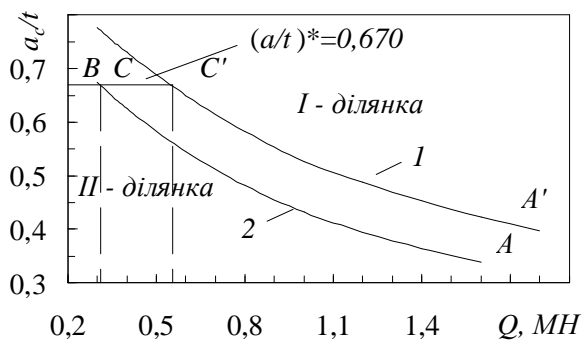


Рисунок 10 – Взаємозв'язок критичної ( $a_c/t$ ) глибини зовнішньої (а) та внутрішньої (б) поперечної кільцевої тріщини у стінці резервної (1) та експлуатованої (2) бурильних труб групи міцності "Л" та ваги бурильної колони ( $Q$ )

Одержані результати дозволяють інтерпретувати суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колон під час спуско-підіймальних операцій, описаних в роботах [1, 3–6].

Аналіз результатів проведених розрахунково-експериментальних досліджень свідчить, що для оцінки умов руйнування резервних та тривало експлуатованих бурильних труб групи міцності "Л", що містять поперечні кільцеві тріщини, необхідно, по-перше, враховувати характер розміщення поперечної кільцевої тріщини (зовнішня чи внутрішня), по-друге на малих глибинах необхідно враховувати показник "опірності елемента конструкції поширенню тріщини", по-третє, враховувати тривалість

експлуатації бурильної труби. Зауважимо, що критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  як характеристику силового критерію руйнування металу труб бурильної колони, необхідно враховувати на глибинах від 2,2 км до 3,1 км – для тривало експлуатованих та резервних труб, що містять зовнішню – I ділянка ( $CA$  та  $C'A'$ ) на рис. 7 та на глибинах від 0,7 км до 1,3 км – для тривало експлуатованих та резервних труб, що містять внутрішню – I ділянка ( $CA$  та  $C'A'$ ) на рис. 10 поперечну кільцеву тріщину.

Таким чином, під час спуско-підіймальних операцій визначальним чинником, що призводить до суттєвого збільшення кількості аварій бурильних колон із зовнішніми поперечними кільцевими тріщинами під час буріння на глибинах понад 2,2 км, а для бурильних колон, що містять внутрішні поперечні кільцеві тріщини під час буріння на глибинах понад 0,7 км, є втрата металу бурильних труб опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості. Причому (див. табл. 4), більш небезпечними на цих глибинах є внутрішні поперечні кільцеві тріщини, тоді як на менших глибинах (до 0,5 км) більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини, оскільки визначальним чинником тут є характеристична глибина втомної тріщини  $a^*$ .

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

L, км	Критична зовнішня поперечна кільцева тріщина $a_c, (a^*), \text{ мм}$		Критична внутрішня поперечна кільцева тріщина $a_c (a^*), \text{ мм}$	
	резерв.	експл.	резерв.	експл.
0,5	7,2 (4,8)	6,0 (4,3)	7,2 (6,0)	5,7 (5,4)
1	6,6 (4,8)	5,4 (4,3)	6,4 (6,0)	5,0
2	5,6 (4,8)	4,4 (4,3)	5,3	4,0
3	4,83 (4,8)	3,7	4,6	3,4
4	4,3	3,0	4,0	2,8
5	3,8	2,7	3,7	2,3

### Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінювання умов критичного руйнування під час спуско-підіймальних операцій 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 зовніш-

ньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах понад 3,1 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,5 км до 3,1 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”. Тоді як для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах від 1,3 км до 5 км, вона визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,5 км до 1,3 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 2,2 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,5 км до 2,2 км – показником “опірності елемента конструкції поширенню тріщини”. Для аналогічних бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах від 0,7 км до 5 км визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 0,5 км до 0,7 км – показником опірності елемента конструкції поширенню тріщини.

5. Оцінка умов критичного руйнування під час спуско-підіймальних операцій рівномірно навантажених бурильних труб засвідчує, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 2 км, тоді як в інтервалі глибин від 0,5 км до 2 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

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

### **Література**

1 Річний звіт НАК «Нафтогаз України». – 2014. – 198 с.

2 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.

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

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

5 Macdonald, K.A. Failure Analysis of Drillstrings. / K.A. Macdonald, J.V. BJune // Engineering Failure Analysis. – 2007. – Vol. 14, Is. 8. – P 1641-1666.

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. – P 605-623.

7 Карпаш О.М. Методи та засоби забезпечення роботоздатності трубних колон: автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 47 с.

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

9 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.

10 Harris D.O. Stress Intensity Factor for Hollow Circumferentially Notched Round Bars // 89, Trans. ASME: J. of Basic Engineering. – 1967. – 89. – P. 103-106.

11 Витязь О. Ю. Експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон при спуско-підіймальних 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.

12 Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / Панасюк В.В. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.

13 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506-85 – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

14 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.

15 Сароян А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. / А.Е. Сароян. – М.: Недра, 1990. – 263 с.

16 Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: в 2 т. / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т.2. – 368 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.06.17*

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