

## ЕКСПРЕС-ОЦІНЮВАННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПІД ЧАС СПУСКО-ПІДІЙМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

О. Ю. ВИТЯЗЬ<sup>1</sup>, Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут нафтогазової інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра будівельної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, УКРАЇНА

\*email: hrabovskyi.r@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Тривалість спуско-підіймальних операцій у процесі буріння глибоких свердловин складає до 60 % від загального виробничого часу. Експериментально оцінено силовий критерій руйнування металу бурильних труб і замків ( $K_{jc}$ ) та визначено умови, за яких під час спуско-підіймальних операцій можливе руйнування елементів експлуатованих бурильних труб, що містить зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину. Крім того, визначено додаткову умову руйнування елементів експлуатованих бурильних труб за менших від критичного коефіцієнта інтенсивності напружень значень – характеристичну глибину зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, оскільки із незначним збільшенням глибини цієї тріщини коефіцієнт інтенсивності напружень у її вершині швидко зростає до критичних значень  $K_{jc}$  металу труб бурильної колони. Встановлено взаємозв'язок критичних і характеристичних глибин зовнішньої або внутрішньої поперечних кільцевих тріщин у бурильних трубах та замках із 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 1 км до 2 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини. Запропоновано експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих бурильних труб, яка дає можливість інтерпретувати результати їх технічного діагностування.

**Ключові слова:** умови руйнування бурильних труб; критичний коефіцієнт інтенсивності напружень; критичний розмір зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини; характеристична глибина зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини

## EXPRESS-EVALUATION OF CONDITIONS OF OPERATED DRILL PIPE ELEMENTS FAILURE DURING TRIPS

O. YU. VYTYAZ<sup>1</sup>, R. S. HRABOVSKIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of construction mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, UKRAINE

**ABSTRACT** Duration of trips in the process of deep holes drilling accounts for up to 60% of the total production time. Experimentally evaluated is the power criterion of drill pipes and tool  $K_{jc}$  joints metal destruction and defined were conditions under which during trips possible is the failure of operated drill pipe elements containing external or internal circumferential transverse crack. Also, it was determined an additional condition of operated drill pipes elements failure for less than the critical stress intensity factor values - the characteristic depth of external or internal transverse annular crack because with a slight increase in depth of the crack the stress intensity factor at its top quickly rises to critical values  $K_{jc}$  of the drill pipe metal. The interrelation of critical and characteristic depths of external or internal circumferential transverse cracks in drill pipes and tool joints with the drill string weight was determined. It is shown that the internal circumferential transverse cracks during drilling string trips are more dangerous at depths exceeding 2 km than external ones whereas in the depth interval from 1 km to 2 km the external transverse annular cracks are more dangerous. The express-evaluation of conditions of operated drill pipe elements failure is suggested which enables interpreting the results of their technical diagnostics.

**Keywords:** conditions of drill pipes failure; critical coefficient of stress intensity; critical size of external or internal circumferential transverse crack; characteristic depth of external or internal circumferential transverse crack

### Вступ

Загальнодержавні потреби України значно перевищують видобування вуглеводневих енергоносіїв, оскільки на даний час видобуток нафти

становить 10-12%, а природного газу – 46-48%. Однак на великій глибині – орієнтовно 6,5-7 тисяч метрів – на території Дніпрово-Донецької западини і Карпатської нафтогазової провінції є величезні запаси нафти і газу. У зв'язку з цим виникає потреба в

бурінні глибоких та надглибоких свердловин. Проте, як свідчить практика [1], буріння на таких глибинах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій елементів бурових 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 [1].

При роторному бурінні, внаслідок зародження біля концентратора напружень (впадина першого витка як зовнішньої, так і внутрішньої різьби, корозійна виразка, технологічна риска, дефекти зварного шва, тощо) та розвитку магістральної тріщини до критичних розмірів, спричинених дією втомних навантажень, які діють на бурильну трубу та впливом промивальної рідини [2-7] найбільш часто зустрічається поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70 % від загальної кількості аварій [1,3,8,9,11].

У переважній більшості випадків неконтрольоване поперечне руйнування тіла труби викликане дією значних статичних навантажень, високими робочими тисками та критичними розмірами поперечної замкнутої або півеліптичної тріщини, що зароджується та розвивається в місцях концентраторів напружень через пошкодження роторними клинами [1, 3] або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, заминання та волосин) [5], а також у разі порушення технології спуско-підймальних операцій, наприклад, піднімання на одному стропі [1, 3]. Причиною полама бурильних труб по тілу можуть бути й інші концентратори напружень, такі як корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до поширення (розвитку) тріщин [4, 11].

Таким чином, руйнування елементів бурових колон пов'язане зі специфікою буріння. Причому, на великих глибинах воно визначається домінуючим впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають в процесі буріння та спуско-підймальних операцій, які зумовлюють розвиток у місцях пошкоджень тріщин в поперечному перерізі тіла труби [7] або бурового замка [4, 5].

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

Оскільки в процесі спуско-підймальних операцій, спричинених впливом статичних навантажень (ваги колони), найбільш поширеним є руйнування бурильної колони в поперечному перерізі шляхом відриву, то важливим є визначення руйнівних умов.

У зв'язку з цим, розрахунково-експериментальне оцінювання умов, за яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів бурильної колони є актуальною науково-технічною проблемою.

### Мета роботи

Оцінювання умов руйнування тривало-експлуатованих бурових труб із наявними тріщинами під час спуско-підймальних операцій, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

### Викладення основного матеріалу

Матеріалом дослідження є фрагмент бурильної труби ТБПВ з умовним діаметром 127 мм із привареним буровим замком 3-155, яка 23 роки використовувалася для буріння свердловин нафтогазових родовищ Західної України. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сталей бурильної труби (36Г2С) та замка (40ХН), мас. %

Сталь 36Г2С								
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
Сталь 40ХН								
C	Cr	Ni	Si	V	Cu	Al	S <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
0,41	1,12	0,97	0,19	0,13	0,04	0,09	0,017	0,014

Механічні характеристики тривало експлуатованих сталей бурильної труби та замка (табл. 2) визначались за стандартною процедурою [12] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг.

Таблиця 2 – Механічні характеристики сталей бурильної труби з привареним замком 3-155

Сталь	Тривалість експлуатації, роки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
36Г2С	23	790,0	605,0	12,5	27,0
40ХН	23	885,0	762,5	10,0	14,5

Оцінювання умов, за яких відбувається руйнування металу труб бурильної колони, здійснювали за методикою [13], експериментально визначаючи величину  $J_c$ . Для цього вирізали по п'ять зразків з фрагментів бурильної труби групи міцності "Л" розміром 200,0×10,0×8,0 мм та бурильного замка 3-155 розміром 200,0×10,0×10,0 мм. При цьому оцінювали роботу A (площа під діаграмою деформування, рис. 2),

витрачену на деформування зразка з попередньо зародженою тріщиною  $l_{cep} = 0,45 \cdot h$  (рис. 1а) як елемента конструкції, при якій він має здатність втрачати свої несучі властивості, віднесена до нетто площі деформованої поверхні зразка  $S_f$  (рис. 1б).

$$J_c = \frac{A}{S_f} \quad (1)$$



Рис. 1 – Загальний вигляд зразка (а) та площі деформованої поверхні зразка (б) після експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованої бурильної труби

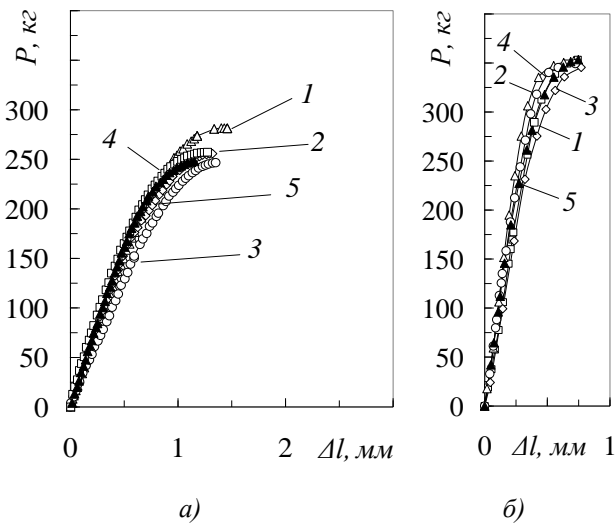


Рис. 2 – Діаграма деформування  $P - \Delta l$  зразків з фрагментів бурильної труби групи міцності "Л" (а) та бурильного замка 3-155 (б)

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі представлені критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{Jc}$ , який обчислювали за допомогою рівняння:

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

де  $J_c$  – критична тріщиностійкість;  $E$  – модуль Юнга ( $E = 10^{11} \text{ Па}$ );  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей  $\mu = 0,3$ ).

Умови, за яких відбувається руйнування елементів бурильної колони, оцінювали, враховуючи вагу бурової колони  $Q^*$  та критичну глибину наявної в буровій трубі кільцевої тріщини  $a_c$ .

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

Зразок	Бурова труба, група міцності "Л"		Буровий замок 3-155	
	$K_{Jc}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{Jc}^{cep}$ МПа $\sqrt{м}$	$K_{Jc}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{Jc}^{cep}$ МПа $\sqrt{м}$
1	105,78	99,0	85,30	84,5
2	98,80		83,56	
3	99,91		85,80	
4	96,89		83,64	
5	93,62		84,21	

Розглядали випадки руйнування тривало експлуатованої бурової труби  $D = 126 \text{ мм}$ ,  $t = 8,0 \text{ мм}$ , що містить зовнішню або внутрішню замкнену кільцеву тріщину та бурильного замка 3У-155 ( $D = 155 \text{ мм}$ ,  $d = 95 \text{ мм}$ ) із замковою різьбою 3-133 у ймовірних місцях зародження та розвитку зовнішньої кільцевої замкнутої тріщини у ніпелі ( $D_f^N = 124,6 \text{ мм}$ ,  $d = 95 \text{ мм}$ ) та внутрішньої – у муфті ( $D = 155 \text{ мм}$ ,  $d_f^M = 114,3 \text{ мм}$ ). При цьому критичну глибину кільцевої корозійно-втомної тріщини  $a_c$  визначали за умови  $K_I = K_{Jc}$  та враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурової колони ( $Q$ ). Разом з тим, практичний інтерес становить визначення характеристичної глибини корозійно-втомної тріщини  $(a/t)^*$ , при якій різко зростає швидкість зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  [14], а отже, і ризик руйнування дефектної бурової труби у процесі спуско-підіймальних операцій.

Характеристична глибина тріщини  $(a/t)^*$  визначається за методикою [14]. Поточні значення  $dK_I/da = F(a/t)$  (рис. 4) підраховують з кроком  $a/t = 0,01$  та визначають три точки (3), в околі яких виконувались умови:

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

$$(dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 0,10 \rightarrow (a/t)_2 \rightarrow 2; \quad (3)$$

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

За аргументами цих точок визначають координати точок  $L$   $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2], (dK/da)_L)$  та  $M$   $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3], (dK/da)_M)$ . У визначених точках  $L$  і  $M$  (див. рис. 4) проводять дотичні. Аргументом точки перетину цих дотичних є значення глибини критичного дефекту  $(a/t)^*$ , при якому різко зростає швидкість зміни  $(dK_I/da)$  коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  [14].

Умови, за яких можливе руйнування досліджуваних бурильної труби та елемента ніпельної частини різьбового з'єднання бурильної труби по першому з'єднаному витку, що містять зовнішню кільцеву корозійно-втомну тріщину (рис. 3а) глибиною  $a$ , визначали, використовуючи підходи механіки руйнування [14].

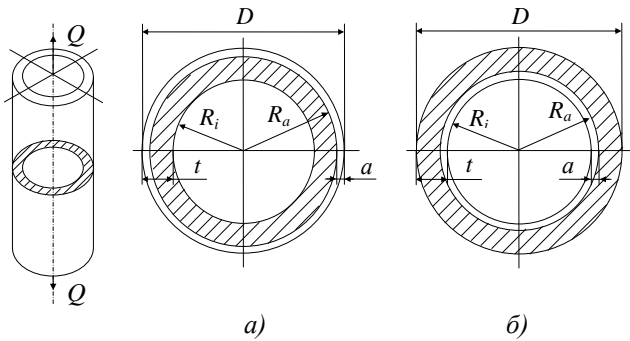


Рис. 3 – Пустотілий циліндр із зовнішньою (а) та внутрішньою (б) поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження

У вершині такої тріщини [14], величина коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  визначається залежністю

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{\sqrt{Y}} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Умови, за яких можливе руйнування бурильної труби та елемента муфтової частини різьбового з'єднання бурильної труби по першому з'єднаному витку ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм), що містять внутрішню поперечну кільцеву тріщину (рис. 3б) глибиною  $(a/t)^*$ . У вершині такої тріщини [14] величина коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  визначається залежністю

$$K_I = \sigma \frac{F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\pi a}. \quad (6)$$

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

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \sigma \frac{dF}{da} \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} + \frac{\sigma F}{2t} \frac{\sqrt{\pi a}}{\left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \frac{\sigma F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad (7)$$

де функція  $F$  та швидкість її зміни  $dF/da$  визначаються функціональними рядами, які залежить від співвідношення  $R_i/R_a$  [14] ( $R_a = R_i + a$ ).

**Результати оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон під час спуско-підйомальних операцій**

Для розглядуваних випадків побудуємо безрозмірну залежність (рис. 4) типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (8)$$

де  $\sigma$  – прикладене зовнішнє навантаження,  $t$  – товщина елемента бурильної труби у місці руйнування та визначимо характеристичну глибину корозійно-втомної тріщини  $(a/t)^*$ .

У випадку виявленої у бурильній трубі або у ніпельній частині різьбового з'єднання 3-133 зовнішньої поперечної кільцевої тріщини відносна характеристична глибина критичного дефекту практично збігається (рис. 4а – криві 1 та 2) і становить  $(a/t)^* = 0,535$ . Характеристична глибина зовнішньої поперечної втомної тріщини для досліджуваної експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна  $a^* = 4,3$  мм, а по першому з'єднаному витку для ніпельної частини різьбового з'єднання 3-133 – рівна  $a^* = 7,9$  мм.

Для випадку виявленої у бурильній трубі або у муфтовій частині різьбового з'єднання 3-133 (рис. 4б) внутрішньої поперечної кільцевої тріщини відносна характеристична глибина критичного дефекту становить  $(a/t)_r^* = 0,705$  та  $(a/t)_m^* = 0,695$  відповідно. Характеристична глибина внутрішньої поперечної втомної тріщини для досліджуваної експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна  $a^* = 5,6$  мм, а по першому з'єднаному витку муфтової частини різьбового з'єднання 3-133 – рівна  $a^* = 14,4$  мм.

Представлені графічно (рис. 5а) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для металу бурильної труби групи міцності "Л" під час спуско-підйомальних операцій на глибині від 2,9 км до 6 км ( $0,79 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$ ) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні  $4,3 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,8 \text{ мм}$  (рис. 5, ділянка I, крива 1, АВ), тоді як на глибинах від 1 км до 2,9 км небезпечними є кільцеві втомні тріщини глибиною  $a^* = 4,3 \text{ мм}$  (рис. 5, ділянка II, ВС).

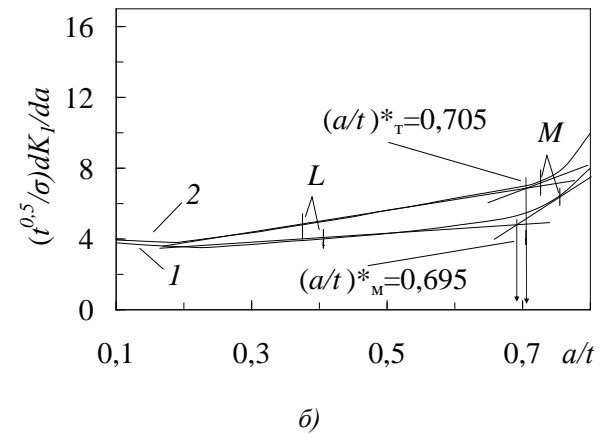
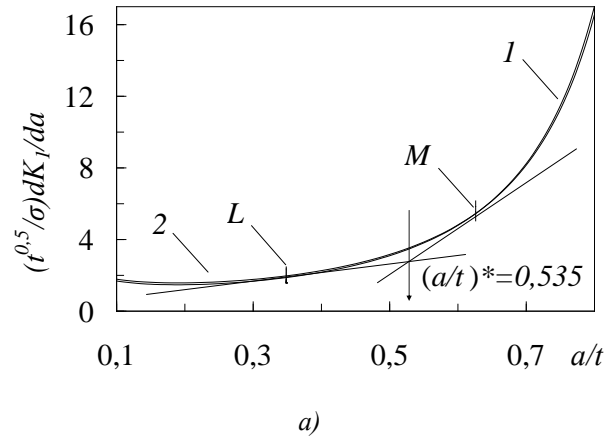
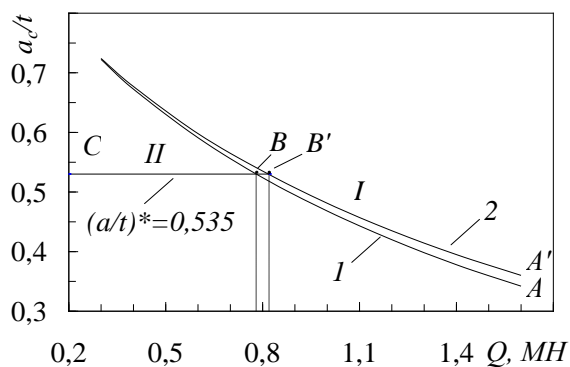


Рис. 4 – Залежність швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  у пустотілому циліндрі із зовнішньою (а) та внутрішньою (б) поперечною кільцевою тріщиною під дією осевого навантаження

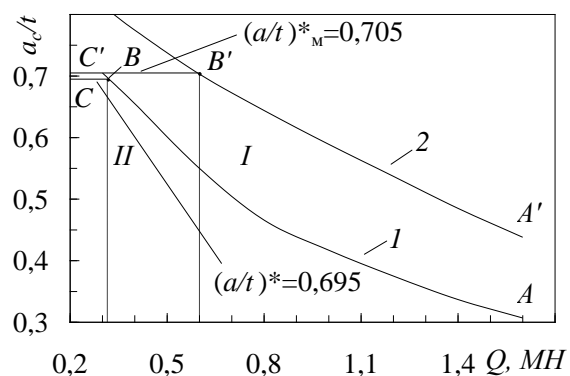
Для металу ніпельної частини різьбового з'єднання бурильного замка ЗУ-155 під час спуско-підйомальних операцій на глибині від 3 км до 6 км критичними є втомні кільцеві тріщини в діапазоні  $7,9 \text{ мм} \geq a_c \geq 5,3 \text{ мм}$  (ділянка I, крива АВ' на рис. 6а), тоді як на глибинах від 1 км до 3 км небезпечними є кільцеві втомні тріщини глибиною  $a^* = 7,9 \text{ мм}$  (ділянка II, крива В'С на рис. 6а).

Результати обчислень (рис. 5б) дають підстави зробити висновок, що під час спуско-підйомальних операцій для бурильної труби груп міцності "Л" на глибинах від 1,2 км до 6 км ( $0,30 \text{ МН} \leq Q \leq 1,60 \text{ МН}$ ) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні  $5,6 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,4 \text{ мм}$  (рис. 5б, ділянка I, крива 1, АВ). На глибинах від 1 км до 1,2 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 5,6 \text{ мм}$  (рис. 5б, ділянка II, крива ВС). Для металу муфтової частини різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підйомальних

операцій на глибині від 2,3 км до 6 км критичними є кільцеві втомні тріщини в діапазоні  $14,4 \text{ мм} \geq a_c \geq 9,0 \text{ мм}$  (рис. 5б, ділянка I, крива  $A'B'$ ), тоді як на глибинах від 1 км до 2,3 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 14,4 \text{ мм}$  (рис. 5б, ділянка II, крива  $B'C'$ ).



а)



б)

Рис. 5 – Вплив ваги бурильної колони ( $Q$ ) на глибину критичної зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (а), розміщеній у стінці бурильної труби груп міцності “Л” (1) та у ніпельній частині різьбового з’єднання 3-133 (2), а також на глибину критичної внутрішньої поперечної кільцевої тріщини (б), розміщеній у стінці бурильної труби груп міцності “Л” (1) та у муфтовій частині різьбового з’єднання 3-133 (2)

За допомогою одержаних результатів можна пояснити суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колони під час спуско-підйомних операцій, описаних у роботах [1,3,7,11].

Узагальнення результатів розрахунково-експериментальних досліджень свідчить, що для оцінювання умов руйнування 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 росту тріщини”. На глибинах понад 2,9 км – для труб, що містять зовнішню (ділянка I, крива 1,  $AB$  на рис. 5а) або від 1,2 км – внутрішню (ділянки I, крива 1,  $AB$  на рис. 5б) поперечну кільцеву тріщину умови руйнування визначаються критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  металу труб бурильної колони. На менших глибинах – ділянка II (крива 1,  $BC$  на рис. 5а та рис. 5б) умови руйнування визначаються характеристичною глибиною зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини за менших від критичного коефіцієнта інтенсивності напружень значень, оскільки із незначним збільшенням глибини цієї тріщини коефіцієнт інтенсивності напружень швидко зростає до критичних значень  $K_{Jc}$  металу труб бурильної колони. Аналогічні тенденції зберігаються при оцінюванні умов руйнування ніпельної та муфтової частини бурильного замка 3У-155

Таким чином, під час спуско-підйомних операцій визначальним чинником, що спричиняє аварійні ситуації тривало експлуатованих бурильних колон із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною у процесі буріння на глибинах понад 2,9 км та із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах понад 2 км (див. табл. 4) є критична глибина тріщини  $a_c$  при досягненні якої, відбувається втрата металу бурильних труб опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості. На менших глибинах, при оцінці умов руйнування, необхідно враховувати характеристичну глибину тріщини  $a^*$ .

Слід також звернути увагу на ту обставину, що при спуско-підйомних операціях внутрішні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 2 км, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 2 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

Зазначена експериментально-розрахункова процедура може бути використана для експрес-оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих елементів бурильних труб. Крім того, її можна застосувати для аналізу результатів технічного діагностування зазначених елементів бурильних труб, та прийняття інженерних рішень, щодо можливостей їх подальшої експлуатації при виконанні спуско-підйомних операцій на задану глибину у процесі буріння свердловин.

Таблиця 4 – Значення глибини критичних  $a_c$  (характеристичних ( $a^*$ )) кільцевих тріщин

H, км	Критична довжина зовнішньої поперечної кільцевої тріщини $a_c, (a^*), мм$		Критична довжина внутрішньої поперечної кільцевої тріщини $a_c, (a^*), мм$	
	група міцності "Л"	ніпельна частина різьбового з'єднання 3-133	група міцності "Л"	муфтова частина різьбового з'єднання 3-133
1	5,9, (4,3)	10,9, (7,9)	5,7, (5,6)	16,9, (14,4)
2	5,1, (4,3)	9,3, (7,9)	4,9	15,0, (14,4)
3	4,2,~(4,3)	7,9, (7,9)	3,8	13,3
4	3,6	7,0	3,2	11,9
5	3,2	6,2	2,8	10,5
6	2,8	5,3	2,4	9,0

### Висновки

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

2. Здійснено експериментальне оцінювання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{JC}$  металу тривало експлуатованих бурильних труб для групи міцності "Л" та бурильного замка ЗУ-155.

3. Встановлено, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб групи міцності "Л" та ніпельної частини різьбового з'єднання 3-133 із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині понад 2,9 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 2,9 км – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини". Для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною та муфтовою частиною різьбового з'єднання 3-133 на глибинах від 1,2 км та 2,0 км до 6 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 1,2-2,0 км – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини".

4. Узагальнене оцінювання умов руйнування під час спуско-підйомних операцій рівно навантажених елементів труб бурильних колон засвідчує, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 2 км, тоді як в інтервалі глибин від

1 км до 2 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

5. Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації технічного діагностування тривало експлуатованих труб бурильних колон.

### Список літератури

1. **Похмурський, В. І.** Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. **В. В. Панасюка**. – Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / **В. І. Похмурський, С. 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. **Lu, S.** Failure analysis of IEU drill pipe wash out / **S. Lu, Y. Feng, F. Luo, C. Qin, X. Wang** // *International Journal of Fatigue*. – 2005. – Vol. 27. – P 1360–1365 doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.07.012.
3. **Івасів, В. М.** Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / **В. М. Івасів, Я. С. Гриджук, А. Р. Юрич** // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – №6/4 (20). – С. 15-17.
4. **Lu, S.** Effect of stress distribution on the tool joint failure of internal and external upset drill pipes / **S. Luo, S. Wu** // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 52. – P 308-314. – doi:10.1016/j.matdes.2013.05.073.
5. **Zhu, X.** Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling / **X. Zhu, L. Dong, H. Tong** // *Engineering Failure Analysis*. – 2013. – Vol. 33. – P 251-264. – doi:10.1016/j.engfailanal.2013.05.017.
6. **Murthy, G. V. S.** Hardbanding failure in a heavy weight drill pipe / **G. V. S. Murthy, G. Das, S. K. Das, N. Parveen, S. R. Singh** // *Engineering Failure Analysis*. – 2011. – Vol. 18. – P 1395-1402. – doi:10.1016/j.engfailanal.2011.03.014.
7. **Macdonald, K. A.** Failure analysis of drillstrings. / **K. A. Macdonald, J. V. BJune** // *Engineering Failure Analysis*. – 2007. – Vol. 14, Is. 8. – P 1641-1666. – doi:10.1016/j.engfailanal.2006.11.073.
8. **Li, F. P.** Piecing Failure Analysis of Drill Pipe Upset / **F. P. Li, Y. G. Liu, Y. Wang** // *Advanced Materials Research* / 2011. – Vol. 314-316. – P. 1210-1213. – doi:10.1016/j.engfailanal.2011.06.018.
9. **Zamani, S. M.** Failure analysis of drill pipe: A review / **S. M. Zamani, S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, H. Sharifi** // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 59. – P. 605-623. – doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.012.
10. **Moradi, S.** Experimental and computational failure analysis of drillstrings / **S. Moradi, K. Ranjbar** // *Engineering Failure Analysis*. – 2009. – Vol. 16, Is. 3. –P. 923-933. – doi:10.1016/j.engfailanal.2008.08.019.
11. **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.
12. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: у 2 т. / **Я. Б. Фридман**. – М.: *Машиностроение*, 1974. – Т. 2. – с. 368.

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. **Дмитрах, І. М.** 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.
6. **Murthy, G. V. S., Das, G., Das, S. K., Parveen, N., Singh, S.R.** Hardbanding failure in a heavy weight drill pipe. *Engineering Failure Analysis*, 2011, Vol. **18**, P. 1395-1402. doi:10.1016/j.engfailanal.2011.03.014.
7. **Macdonald, K. A., Bjune, J. V.** Failure Analysis of Drillstrings. *Engineering Failure Analysis*, 2007, Vol. **14**, Is. 8, P. 1641 - 1666, doi:10.1016/j.engfailanal.2006.11.073.
8. **Li, F. P., Liu, Y. G., Wang, Y.** Piecing Failure Analysis of Drill Pipe Upset. *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. **314 - 316**, P. 1210 - 1213, doi:10.1016/j.engfailanal.2011.06.018.
9. **Zamani, S. M., Hassanzadeh-Tabrizi, S. A., Sharifi, H.** Failure Analysis of Drill Pipe: A Review. *Engineering Failure Analysis*, 2016, Vol. **59**, P. 605-623, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.012.
10. **Moradi, S., Ranjbar, K.** Experimental and Computational Failure Analysis of Drillstrings. *Engineering Failure Analysis*, 2009, Vol. **16**, Is. 3. – P. 923-933, doi:10.1016/j.engfailanal.2008.08.019.
11. **Artym, V. I., Yatsyniak, I. I., Hrytsiv, V. V.** [ta in.] Analiz koroziiino-vtomnykh ruinuван elementiv burylnoii kolony. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2012, № 2 (43), S. 197-202.
12. **Fridman, Ya. B.** Mekhanicheskiie svoistva metalov. Mekhanicheskiie ispytaniia. Konstruktsionnaia prochnost: u 2 t., M.: *Mashynostroieniie*, 1974, T. 2, s. 368.
13. Raschioty i ispytaniia na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniia metallov. Opredeleniie kharakteristik treshchinostoikosti (viazkosti razrusheniia) pri staticheskom nahruzhenni. **HOST 25.506-85** – М.: Изд-во стандартов, 1985, 62 с.
14. **Dmytrach, I. M., Tot, L., Bilyi, O. L., Syrotiuk, A. M.,** Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідник. посіб. / за заг. ред. **В. В. Панасюка**, Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень, Lviv: СПОЛОМ, 2012, 316 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Pochmurskiy, V. I., Kryzhanivskiy, Ye. I., Ivasiv, V. M.** [ta in.] Mekhanika ruinuвання i mitsnist materialiv: dovidnyk. posib. / za zah. red. **V.V. Panasiuka**, Tom 10: Mitsnist ta dovhovichnist naftohazovoho obladnannia. Lviv - Ivano-Frankivsk: *Fizyko-mekhanichniy instytut im. H.V. Karpenka NAN Ukrainy; Ivano-Frankivskiy natsion. tekhn. un-t nafty i hazu*, 2006, 1193 s.
2. **Lu, S., Feng Y., Luo F., Qin C., Wang X.** Failure analysis of IEU drill pipe wash out. *International Journal of Fatigue*, 2005, Vol. **27**, P. 1360–1365. doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.07.012.
3. **Ivasiv, V. M., Hrydzhuik, Ia. S., Yurych A. R.** Analiz prychn ruinuвання elementiv burylnoi kolony. *Tekhnolohicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2014, №6/4 (20), S. 15-17.
4. **Luo, S., Wu S.** Effect of stress distribution on the tool joint failure of internal and external upset drill pipes, *Materials and Design*, 2013, Vol. **52**, P. 308-314. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.073.
5. **Zhu, X. Dong, L., Tong, H.** Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling. *Engineering Failure Analysis*, 2013, Vol. **33**, P. 251 – 264. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.05.017.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Витязь Олег Юлійович** – кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, директор інституту нафтогазової інженерії; м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: o.vytyaz@gmail.com.

**Oleg Yuliovych Vytyaz** – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Director of Institute of Petroleum Engineering, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: o.vytyaz@gmail.com.

**Грабовський Роман Степанович** – доктор технічних наук, професор, кафедра будівельної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com.

**Roman Stepanovych Hrabovskiy** – Doctor of Technical Sciences (Ph. D.), professor, Department of construction mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**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.

*Please cite this article as:*

**Vytyaz, O., Hrabovskiy, R.** Express-evaluation of conditions of operated drill pipe elements failure in tripping. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 30–38, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05.



Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Витязь, О. Ю.** Экспресс-оценка условий разрушения элементов эксплуатируемых труб бурильных колонн при спуско-подъемных операциях / **О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*, Харьков: НТУ «ХПИ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 30-38. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05.

**АННОТАЦИЯ** Продолжительность спуско-подъемных операций у процессе бурения глубоких скважин составляет до 60 % от общего производственного времени. Экспериментально оценен силовой критерий разрушения металла бурильных труб и замков ( $K_{jc}$ ) та определены условия, при которых во время спуско-подъемных операций возможно разрушение элементов эксплуатируемых бурильных труб, содержащих внешнюю или внутреннюю поперечную кольцевую трещину. Кроме этого, определено дополнительное условие разрушения элементов эксплуатируемых бурильных труб при меньших от критического коэффициента интенсивности напряжений значений - характеристическую глубину внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины, поскольку с незначительным увеличением глубины этой трещины коэффициент интенсивности напряжений в ее вершине быстро возрастает до критических значений  $K_{jc}$  металла труб бурильной колонны. Установлена взаимосвязь критических и характеристических глубин внешней или внутренней поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и замках с весом бурильной колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при спуско-подъемных операциях бурильных колонн на глубинах более 2 км являются более опасными чем внешние, тогда как в интервале глубин от 1 км до 2 км более опасны внешние поперечные кольцевые трещины. Предложено экспресс-оценку условий разрушения элементов эксплуатируемых бурильных труб, которая дает возможность интерпретировать результаты их технического диагностирования.

**Ключевые слова:** условия разрушения бурильных труб; критический коэффициент интенсивности напряжений; критический размер внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины; характеристическая глубина внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины

Надійшла (received) 04.03.2017