

# МЕХАНІКА ТА МАТЕМАТИКА

## Механіка

УДК 620.191.33:620.194.8

### ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Є. І. Крижанівський, О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: o.vytyaz@gmail.com*

*Здійснено оцінку силового критерію руйнування металу тривало експлуатованих бурильних труб. Визначено умови, за яких можливе руйнування елементів ніпельної та муфтової частин різьбового з'єднання 3-133 бурильних труб по першому з'єднаному витку, що містить замкнену корозійно-втомну тріщину глибиною  $(a/t)^*$ . Встановлено взаємозв'язок критичних зовнішньої поперечної замкнутої кільцевої тріщини у ніпельній частині та внутрішньої поперечної замкнутої кільцевої тріщини у муфтовій частині різьбового з'єднання бурильної труби із вагою бурильної колони.*

**Ключові слова:** бурильні труби, зовнішня та внутрішня замкнута кільцева тріщина різьбового з'єднання бурильних труб, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Jc}$ , критична  $(a_c/t)$  та характеристична  $(a/t)^*$  глибина внутрішніх або зовнішніх замкнутих кільцевих тріщин.

#### Вступ

На сьогоднішній день проблема забезпечення держави власними енергоресурсами є надзвичайно важливим компонентом її національної безпеки. У світі, у ряді країн, видобуток вуглеводневих енергоносіїв постійно розвивається, що забезпечує їх стабільний розвиток і економічну

та політичну незалежність. В Україні видобуток нафти становить 10-12%, а природного газу – 46-48% [1] від загальнодержавних потреб. 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 показує практика [2, 3], 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.

На практиці спостерігаються декілька видів руйнування по тілу труб: поперечний та спіральний злом, руйнування в поздовжньому напрямі. Очевидно, що характер руйнування в цих випадках визначається доміантним впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають у процесі буріння та спуско-підіймальних операцій.

Аналіз причин руйнування елементів бурильних колон показав, що суттєва частка аварійних ситуацій пов'язана зі специфікою буріння. Так, під час роторного буріння найбільш часто трапляється поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70% від загальної кількості аварій [4], 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.

Отже, на початковому етапі розвиток тріщин в поперечному перерізі тіла труби переважно має втомний характер і викликаний концентрацією напружень у місцях пошкоджень, перпендикулярних до осі труби. До них належать: нанесене на трубу тавро, поперечні risks, що виникають при роботі з клинами, дефекти прокату, корозійні виразки та інше. Крім того, поперечне руйнування спостерігається також біля стишковарних труб в зоні зварки або в зоні термічного впливу.

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 або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, закатів та волосин), а також у разі порушення технології спуско-підіймальних операцій, наприклад піднімання на одному стропі. Причиною поломки бурильних труб по тілу можуть бути також і корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до поширення (розвитку) тріщин.

Таким чином, аналіз раптових відмов, пов'язаних з бурильною колоною, дозволяє виокремити три групи факторів, взаємодія яких у більшості випадків і створює умови для виникнення аварійних ситуацій:

- вид та характер (умови) навантаження;
- технічні та експлуатаційні концентратори напружень;
- вплив корозивних середовищ.

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації бурильних колон вимагає підвищеної уваги при оцінці та врахуванні вищезгаданих чинників і прийнятті відповідного інженерного (управлінського) 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-експериментальна оцінка умов, при яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів бурильної колони, є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета даної роботи – оцінити умови руйнування тривало експлуатованих бурильних труб із наявними тріщинами при спуско-підймальних операціях, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

### **1. Методичні засади експериментально-чисельної оцінки умов руйнування бурових труб**

Причиною виникнення небезпечного стану, а в окремих випадках [5, 6, 7] руйнування бурильних труб є утворення на зовнішній або внутрішній поверхні бурильної труби корозійно-втомних тріщин, спричинене експлуатаційними циклічними навантаженнями. Згідно з даними діагностичного контролю такі тріщини зароджуються на дні корозійних виразок, технологічних рисок або біля концентраторів напружень (наприклад, впадина першого витка як зовнішньої так і внутрішньої різьби). Як правило, вони набувають півеліптичної форми ( $a/c$ ) з розмірами півосей  $a$  та  $c$ , хоча в окремих випадках утворюються замкнуті кільцеві тріщини глибиною  $a$  ( $a/t$ ).

Для оцінки умов руйнування бурильних труб необхідно, поперше, мати експериментальні дані, за яких відбувається катастрофічне руйнування металу бурильних труб, по-друге – розрахункові дані про критичні розміри корозійно-втомних тріщин, утворених під впливом змодельованого експлуатаційного навантаження бурильних колон.

При цьому для оцінки катастрофічного руйнування металу бурильної труби використовували методику [8], яка дослідним шляхом дозволяє визначити його критичну тріщиностійкість  $J_c$  на основі експериментально одержаної діаграми руйнування зразків “зусилля-прогин” та обчислити значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  та визначити за допомогою співвідношення [9]

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

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

Крім того, важливою є оцінка міцності та ризику руйнування експлуатованих бурових труб на основі показника “опірності елемента конструкції (бурильної труби) росту тріщини”. Глибина корозійно-втомної тріщини  $(a/t)^*$ , при якій різко зростає швидкість  $(dK_I/da)$  зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  [5], системи “метал труби – середовище” є характерним параметром, під час досягнення якого різко зростає ймовірність руйнування бурової труби.

Аналіз корозійно-втомних руйнувань дозволяє виокремити декілька розрахункових схем та оцінити умови руйнування елементів бурової колони.

## 2. Визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{Jc}$ металу бурових труб

Матеріалом дослідження є фрагменти бурових труб, які впродовж 15 років використовувалися для буріння свердловин нафтогазових родовищ Західної України. Для цього з фрагментів бурових труб вирізали п’ять зразків розміром  $200 \times 10 \times 8,4$  мм.

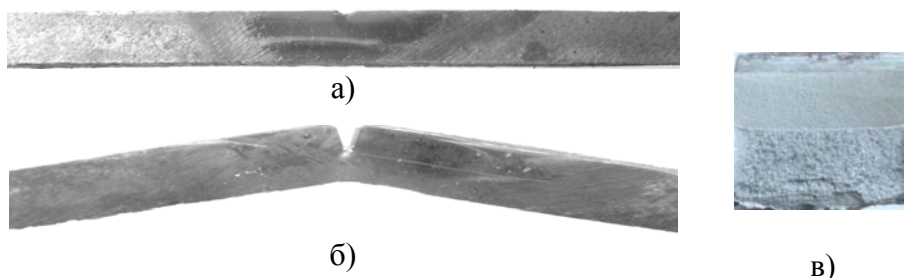


Рис. 1. Загальний вигляд зразка до (а) та після (б) експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованих бурових труб

Оцінку умов, за яких відбувається катастрофічне руйнування металу труб бурової колони, здійснювали за методикою [8, 10], експериментально визначаючи величину  $J_{Ic}$ . Оцінювали при цьому роботу  $A$ , витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною  $l_{cep}$ , як елемента конструкції, при якій він втрачає свої несучі властивості, віднесено до нетто площі деформованої поверхні зразка  $S$  (рис. 2)

$$J_{Ic} = \frac{A}{S_f}. \quad (2)$$

Подані в роботі характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 1) представляли критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{Jc}$ , який обчислювали за допомогою рівняння (1).

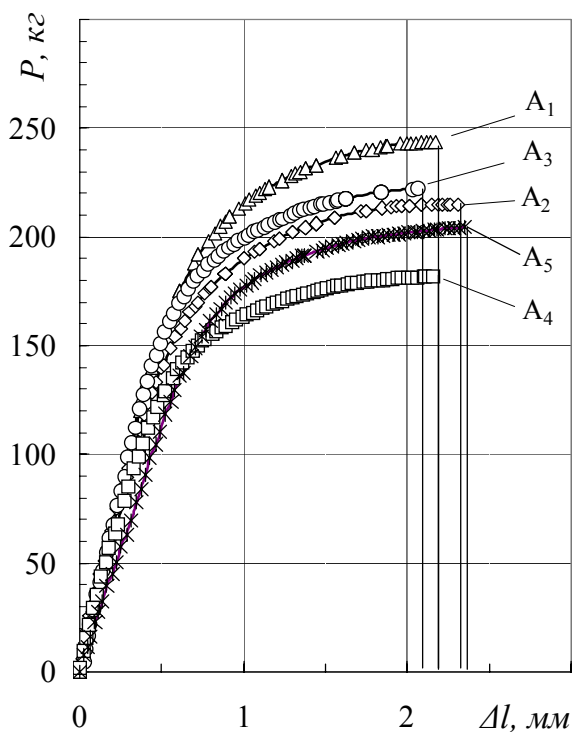


Рис. 2. Діаграма деформування  $P-\Delta l$  зразків з фрагментів бурильної труби  $D = 126$  мм,  $d = 109,2$  мм

Таблиця 1. Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_{Jc}$

Зразок	$K_{Jc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$K_{Jc}^{sep}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
1	130,8	130,8
2	129,2	
3	130,1	
4	130,0	
5	133,7	

### 3. Оцінка міцності та ризику руйнування елементів експлуатованих бурильних труб

Практика експлуатації бурильних колон, за результатами неруйнівного контролю, засвідчує наявність тріщин глибиною близько 2 мм, причому час утворення тріщин у замкових з'єднаннях становить 10-

20% їх ресурсу [11]. Поширеним випадком раптових відмов бурильних колон (~28,3%) [6] є руйнування замкового різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підйомальних операцій. У цьому випадку причиною руйнування труб є утворення та розвиток за втомним механізмом зовнішньої або внутрішньої замкнутої кільцевої або півеліптичної тріщини. Оцінку умов, за яких відбувається катастрофічне руйнування елементів бурильної колони, здійснювали за двома параметрами:

- глибина наявної в бурильній трубі тріщини  $a_c$ ;
- вага бурильної колони  $Q^*$ .

Розглянемо випадок руйнування тривало експлуатованої бурильної труби  $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм, що містить зовнішню замкнену кільцеву тріщину, та бурильного замка ЗУ-155 ( $D = 155$  мм,  $d = 95$  мм) із замковою різьбою З-133 у ймовірних місцях зародження та розвитку зовнішньої кільцевої замкнутої тріщини у ніпелі ( $D_f^N = 124,6$  мм,  $d = 95$  мм) та внутрішньої – у муфті ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм).

### 3.1. Оцінка умов руйнування бурильних труб та елементів ніпельної частини з'єднання бурильних труб із зовнішньою замкнутою кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження

Визначимо умови, за яких можливе руйнування як бурильних труб, так і елемента ніпельної частини різьбового з'єднання бурильних труб по першому з'єднаному витку, що містять зовнішню замкнену корозійно-втомну тріщину (рис. 3) глибиною  $(a/t)^*$ .

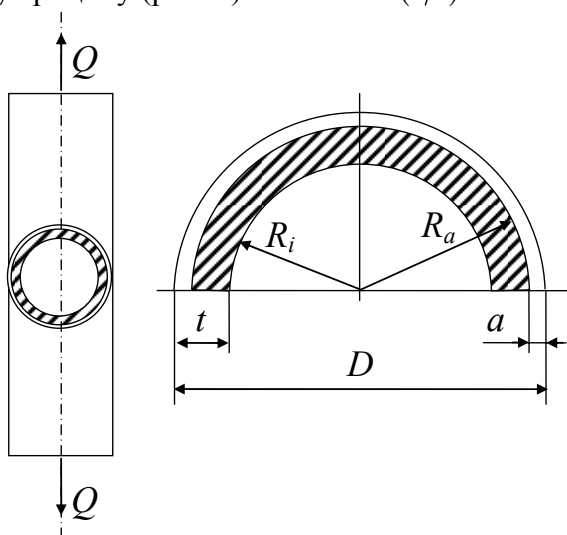


Рис. 3. Пустотілий циліндр під дією осьового навантаження з зовнішньою поперечною замкнутою кільцевою тріщиною

У вершині такої тріщини [5] величина коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  визначається залежністю

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{\sqrt{Y}}, \quad (3)$$

$$\text{де } F = \frac{1 - R_{ia}^2}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}\right]^2 - R_{ia}^2}, \quad Y = 0,8 + (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \frac{H}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}\right]},$$

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

Критичну глибину замкненої корозійно-втомної тріщини  $a_c$  визначали із залежності (3) за умови  $K_I = K_{Jc}$ , враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурової колони ( $Q$ )

$$a_c = \frac{K_{Jc} Y}{\pi \sigma^2 F^2}, \quad (4)$$

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

Крім того, практичний інтерес становить визначення характеристичної глибини корозійно-втомної тріщини  $(a/t)^*$ , при якій різко зростає швидкість зміни коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$ , а отже, і ризик руйнування дефектної бурильної труби під час спуско-підіймальних операцій.

Величину швидкості зміни  $(dK_I/da)$  коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  визначимо, використовуючи залежність [5]

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

$$\text{де } \frac{dF}{da} = \frac{2(R_{ia} - 1) \left[ \frac{a(R_{ia} - 1)}{t} + 1 \right] (R_{ia}^2 - 1)}{t \left\{ \left[ 1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]^2 - R_{ia}^2 \right\}}, \quad \frac{dH}{da} = 1,08 \frac{R_{ia}}{t(1 - R_{ia}) \left( 1 - \frac{a}{t} \right)^2},$$

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

Розглянемо випадок руйнування замкового різьбового з'єднання ЗУ-155 по першому з'єднаному витку ( $D_f = 124,6$  мм,  $d = 95$  мм) елемента ніпельної частини різьбового з'єднання 3-133 бурильних труб з висадженими всередину кінцями та експлуатованої бурильної труби ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм).

Для цих випадків побудуємо відповідну безрозмірну залежність типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (6)$$

де  $\sigma$  – прикладене зовнішнє навантаження,  $t$  – товщина бурильної труби у місці руйнування (рис. 4).

Для визначення характеристичної глибини корозійно-втомної тріщини  $(a/t)^*$  у першому з'єднаному витку ніпельної частини різьбового з'єднання бурильних труб з висадженими всередину кінцями та експлуатованої бурильної труби використаємо методику [5]. Поточні значення  $dK_I/da = F(a/t)$  підраховували з кроком  $a/t = 0,01$  та визначали три точки, в околі яких виконувались умови

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

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

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

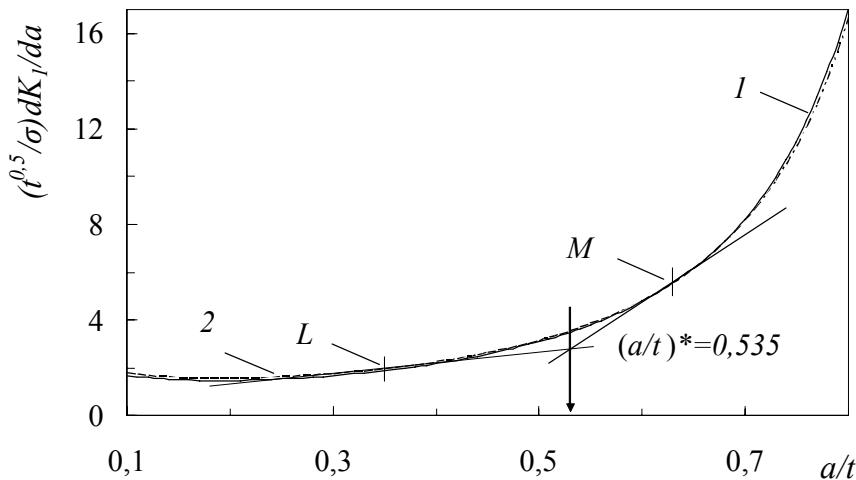


Рис. 4. Оцінювання небезпеки зовнішньої поперечної замкнутої кільцевої тріщини у першому з'єднаному витку ( $D_f^N = 124,6$  мм,  $d = 95$  мм) елемента ніпельної частини різьбового з'єднання 3-133 бурильних труб з висадженими всередину кінцями (1) та експлуатованої бурильної труби (2) під дією осьового навантаження

За аргументами цих точок визначали координати точок  $L$   $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2], (dK/da)_L)$  та  $M$   $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3], (dK/da)_M)$ . У визначених точках  $L$  і  $M$  (див. рис. 4) проводили 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  $K_I$ . Для розглядуваних випадків (рис.4, криві 1 та 2) відносна глибина критичного дефекту практично збігається  $(a/t)^* = 0,535 \cdot (a/t)$ .

Таким чином, характеристична глибина зовнішньої замкнутої втомної тріщини для досліджуваної нами ніпельної частини різьбового з'єднання бурильних труб є  $a^* = 7,9$  мм. А характеристична глибина зовнішньої втомної тріщини  $(a/t)^*$  експлуатованої бурильної труби ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм) становить  $a^* = 4,5$  мм.

Крім того, враховуючи особливості руйнування металу труби ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм) та використовуючи залежність (4), встановимо взаємозв'язок між критичною глибиною замкнутої втомної тріщини  $a_c/t$  та вагою бурильної колони  $Q$ , що визначається глибиною свердловини. Представлені графічно (рис. 5) результати обчислень дозволяють зробити висновок, що під час спуско-підймальних операцій на глибинах від 4 км до 6 км ( $1,05 \leq Q \leq 1,6$  МН) критичними для металу бурильних труб є втомні тріщини в діапазоні  $4,5 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,55 \text{ мм}$  (ділянка I, крива SA рис. 5), тоді як на глибинах від 1 км до 4 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 4,5$  мм (ділянка II, крива BC рис. 5). Для металу ніпельної частини різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підймальних операцій на глибині від 4,9 км до 6 км критичними є втомні тріщини в діапазоні  $7,9 \text{ мм} \geq a_c \geq 7,0 \text{ мм}$  (ділянка I, крива C'A' рис. 5), тоді як на глибинах від 1 км до 4,9 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 7,9$  мм (ділянка II, крива BC' рис. 5).

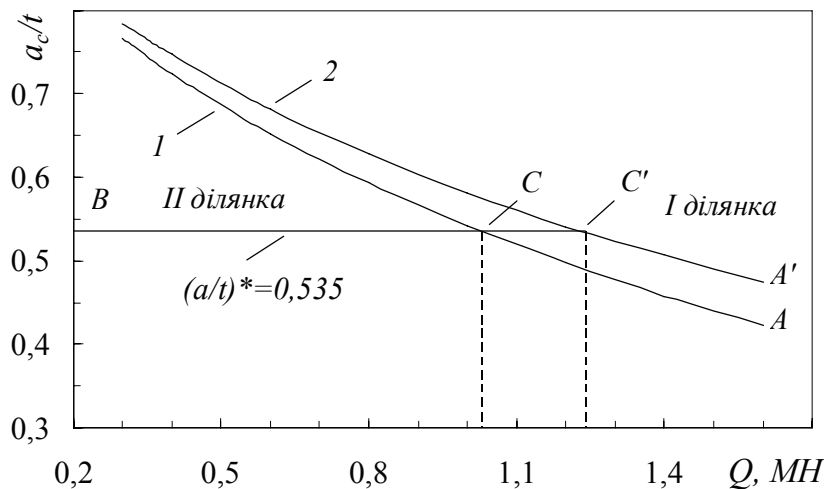


Рис. 5. Взаємозв'язок критичної зовнішньої поперечної замкнутої кільцевої тріщини у стінці бурильної труби (1), а також у ніпельній частині різьбового з'єднання 3-133 (2) та ваги бурильної колони ( $Q$ )

### 3.2. Оцінка умов руйнування бурильних труб та елементів муфтової частини з'єднання бурильних труб із внутрішньою замкнутою кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження

Визначимо умови, за яких можливе руйнування як бурильних труб ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм), так і елемента муфтової частини різьбового з'єднання бурильних труб по першому з'єднаному витку ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм), що містять внутрішню замкнену корозійно-втомну тріщину (рис.6) глибиною  $(a/t)^*$ .

У вершині такої тріщини [5] 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  $R_i/R_a$  [5] ( $R_a = R_i + a$ ).

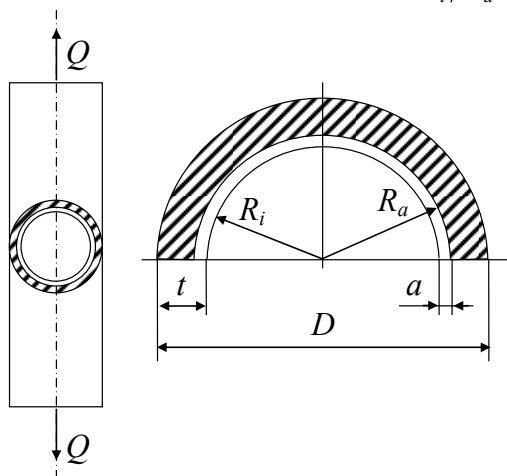


Рис. 6. Пустотілий циліндр під дією осьового навантаження з внутрішньою поперечною замкнутою кільцевою тріщиною

Встановимо характеристичну глибину внутрішньої замкненої кільцевої тріщини  $(a/t)^*$  для досліджуваного елемента муфтової частини різьбового з'єднання даної труби у найбільш імовірному місці його

руйнування ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм). Для цього побудуємо безрозмірну залежність типу  $\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$  (див. рис. 7, крива 1), та визначимо місця із різким зростанням швидкості зміни ( $dK_I/da$ ) коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  під час спуско-підйомальних операцій бурильної труби. За описаною вище методикою [5] визначимо координати точок  $L$  ( $0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2]$ ,  $(dK/da)_L$ ) та  $M$  ( $0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3]$ ,  $(dK/da)_M$ ).

За аналогічною процедурою побудуємо безрозмірну залежність типу  $\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$  та визначимо характеристичну глибину внутрішньої замкнутої кільцевої тріщини  $(a/t)^*$  (див. рис. 7, крива 2) для досліджуваного елемента бурильної труби.

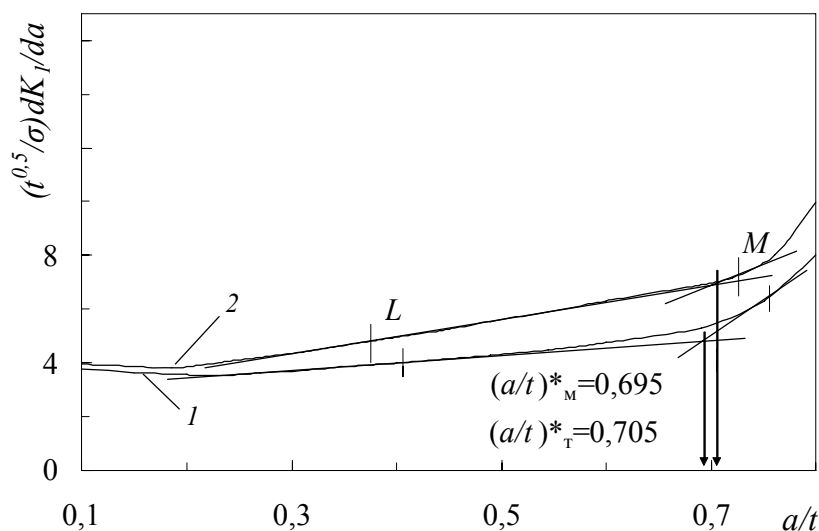


Рис. 7. Оцінювання небезпеки внутрішньої поперечної замкнутої кільцевої тріщини у першому з'єднаному витку ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм) елемента муфтової частини різьбового з'єднання 3-133 бурильних труб з висадженими всередину кінцями (1) та експлуатованої бурильної труби (2) під дією осевого навантаження

Характеристична глибина внутрішньої замкнутої втомної тріщини для досліджуваної нами муфтової частини різьбового з'єднання бурильних труб ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм) становить  $a^* = 14,1$  мм, тоді як для експлуатованої бурової труби ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм) вона рівна  $a^* = 5,9$  мм.

Встановимо взаємозв'язок між критичними глибинами внутрішньої замкненої втомної тріщини  $a_c/t$  для досліджуваних об'єктів та вагою бурильної колони  $Q$ , що визначається глибиною свердловини.

Результати обчислень (рис. 8) дозволяють зробити висновок, що під час спуско-підймальних операцій на глибинах від 4 км до 6 км ( $1,05 \leq Q \leq 1,6$  МН) критичними для металу бурильних труб є втомні тріщини в діапазоні  $4,55 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,5 \text{ мм}$  (ділянка I, крива DA на рис. 8). Критичні для металу бурильних труб втомні тріщини в діапазоні  $5,8 \text{ мм} \geq a_c \geq 4,55 \text{ мм}$  (ділянка I, крива CD на рис. 8) є небезпечними під час спуско-підймальних операцій на глибинах від 1,8 км до 4 км ( $0,48 \leq Q \leq 1,05$  МН). На глибинах від 1 км до 1,8 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 5,8 \text{ мм}$  (ділянка II, крива BC на рис. 8). Для металу муфтової частини різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підймальних операцій на глибині від 3,5 км до 6 км критичними є втомні тріщини в діапазоні  $14,45 \text{ мм} \geq a_c \geq 12,0 \text{ мм}$  (ділянка I, крива C'A' на рис. 8), тоді як на глибинах від 1 км до 3,5 км небезпечними є втомні тріщини глибиною  $a^* = 14,45 \text{ мм}$  (ділянка II, крива B'C' на рис. 8).

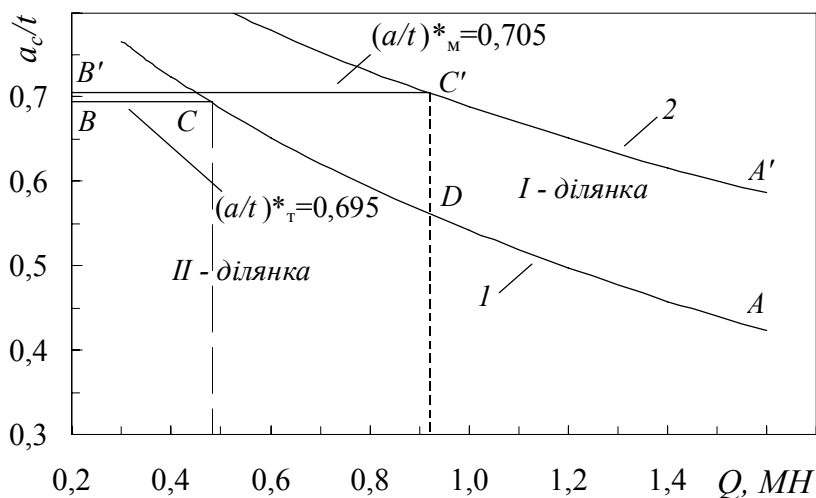


Рис. 8. Взаємозв'язок критичної внутрішньої поперечної замкненої кільцевої тріщини, наявної у стінці бурильної труби (1), а також у муфтовій частині різьбового з'єднання 3-133 (2) та ваги бурильної колони ( $Q$ )

Одержані результати дозволяють інтерпретувати суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колон при спуско-підймальних операціях, описаних в роботах [1, 3].

Аналіз результатів проведених розрахунково-експериментальних досліджень показує, що для оцінки умов руйнування тривало експлуатованих елементів бурильної колони на глибинах до 4 км необхідно враховувати показник “опірності елемента конструкції росту тріщини”, а на глибинах понад 4 км – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  як характеристику силового критерію руйнування металу труб бурильної колони.

### **Висновки**

Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінки умов критичного руйнування тривало експлуатованих елементів бурильної колони, що містять втомну замкнену кільцеву (зовнішню або внутрішню) тріщину.

Здійснено експериментальну оцінку критичного коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{Jc}$  металу тривало експлуатованих бурильних труб.

Встановлено, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб ( $D = 126$  мм,  $t = 8,4$  мм) із зовнішньою замкненою кільцевою тріщиною на глибині понад 4 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труби, а в інтервалі від 1 км до 4 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”. Для бурильних труб із внутрішньою замкненою кільцевою тріщиною на глибині від 1,8 км до 6 км визначається тріщиностійкістю металу труби, а в інтервалі від 1 км до 1,8 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”.

Визначено критичні розміри руйнування елементів бурильного замка ЗУ-155 із замковим різьбовим з’єднанням З-133. Встановлено, що руйнування ніпельної частини різьбового з’єднання ( $D_f^N = 124,6$  мм,  $d = 95$  мм) по першому з’єднуваному витку, що містить замкнену кільцеву тріщину, на глибині понад 4,9 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труби, а в інтервалі від 1 км до 4,9 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”.

Оцінено умови критичного руйнування муфтової частини різьбового з’єднання бурильної труби ( $D = 155$  мм,  $d_f^M = 114,3$  мм) по першому з’єднуваному витку, що містить замкнену кільцеву тріщину, на глибині понад 3,5 км визначається критичною тріщиностійкістю металу труби, а в інтервалі від 1 км до 3,5 км – показником “опірності елемента конструкції росту тріщини”.

Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації технічного діагностування тривало експлуатованих елементів бурильної колони.

### *Література*

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

2. Козаченко Н.И. Вопросы надежности бурильных колонн / Н.И. Козаченко // Обзор техн. и технол. геол. развед. работ, орг. производства. – М.: ВИЭМС, 1978. – 37 с.
3. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів, О.М. Карпаш, Б.В. Копей, Я.С. Коцкулич, Б.Д. Малько, Ю.В. Міронов, Ю.Д. Петрина; за заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів–Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.
4. Івасів В.М. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / В.М. Івасів, Я.С. Гринджук, Л.Р. Юрич // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – №6/4 (20). – С. 15-17.
5. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк; за заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 316 с.
6. Крыжановский Е.И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин / Е.И.Крыжановский // Дисс. докт. тех. наук. – М., 1990. – 480 с.
7. Карпаш О.М. Методи та засоби забезпечення роботоздатності трубних колон: Автореф. дис. докт. тех. наук / О.М. Карпаш – Івано-Франківськ, 1996. – 47 с.
8. Оцінка умов руйнування трубопроводів тривалої експлуатації / Р.С. Грабовський, О.М. Лепак, М.П. Мазур, І.Я. Федорович, Р.А. Барна // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2015. – №1 (38). – С. 46-53.
9. 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; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.
10. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
11. Копей Б.В. Науково-технологічні методи комплексного підвищення ресурсу деталей свердловинного нафтогазового обладнання: Автореф. дис. докт. тех. наук / Б.В.Копей. – Івано-Франківськ, 1996. – 46 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 27.03.2016 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Копеем Б.В.**, д.т.н., старшим науковим працівником **Сиротюком А.М.** (м. Львів)*

---

---

**TO THE ISSUE OF DRILL STRING FAILURE PARAMETERS  
ESTIMATION DUE TO THE RESULTS OF CALCULATION  
AND EXPERIMENTAL STUDIES**

**Ye.I. Kryzhanivskiy, O.Y. Vytyaz, R.S. Hrabovskyy**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;*

*76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka str., 15;*

*e-mail: o.vytyaz@gmail.com*

*The estimation of the catastrophic failure of the metal of the long-term drill pipes operation was carried out. Determined were the conditions under which there were possible failures of the elements of the nipple and sleeve sections of the drill pipes threaded connection 3-133 on the first connected turn of the thread containing closed corrosion-fatigue crack with a depth  $(a/t)^*$ .*

*The interrelationship of criticals of the external transverse closed circular crack in the nipple section and the internal transverse closed circular crack in the sleeve section of threaded connection with the drill string weight was established.*

**Key words:** *drill pipe, external and internal closed circular crack of drill pipe threaded connection, critical stress intensity factor  $K_{Jc}$ , critical  $(a_c/t)$  and characteristic  $(a/t)^*$  depth of internal and external closed circular depths.*