

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ПЛОЩ КІЛЬЦЕВИХ ДІЛЯНОК ПОВЕРХОНЬ ЗАРІЗЬБОВИХ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ КАНАВОК

*В.Я.Василишин*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 45369,  
e-mail: public@nung.edu.ua*

*Запропоновано загальний алгоритм розрахунку в інженерних параметрах площ кільцевих ділянок поверхонь зарізьбованих розвантажувальних канавок, для яких розроблена графоаналітична модель.*

Ключові слова: площа кільцевої ділянки, зарізьбова розвантажувальна канавка.

*Предложен алгоритм расчета в инженерных параметрах площадей кольцевых участков поверхностей зарезьбованных разгружающих канавок, для которых разработана графоаналитическая модель.*

Ключевые слова: площадь кольцевого участка, зарезьбовая разгружающая канавка.

*The algorithm of calculation in the engineering parameters of circular areas of surfaces out of screw-thread of unloading ditches which a grapho-analytical model is developed for is offered.*

Keywords: area of circular plot, outside screw-threads destroying ditch

### Постановка проблеми

Ефективність буріння свердловин суттєво залежить від експлуатаційної надійності різьбових з'єднань колони. Одним з основних конструктивних чинників, що підвищують опір втомі замкових різьбових з'єднань, є зарізьбова розвантажувальна канавка (ЗРК) [1, 2, 3].

Завдання полягає в теоретичному обґрунтуванні форми і оптимальних розмірів ЗРК на ніпельній і муфтовій частині різьбового з'єднання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив ЗРК на опір знакозмінним згинаючим навантаженням замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб діаметром 75, 145, 178 мм, а також з'єднання корпусів і валів турбобурів діаметром 172 мм дослідив Н.Д.Щербюк [1]. Натурні взірці замкових різьбових з'єднань виготовлялись із сталі 40ХН2МА з границею плинності  $\sigma_{0,2} > (750...800) \text{ МПа}$ .

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить, що ЗРК, виконана на ніпелі, підвищує опір втомі з'єднання ОБТ на 50%, а з'єднань корпусів турбобурів лише на 25%.

Автором [1] було зазначено, що наявність ЗРК зменшує навантаження на перший робочий виток до 30%.

В роботі [4] наводяться результати експериментальних досліджень ЗРК на ніпелі на опір втомі різьбових з'єднань з різьбою 3-42, виготовлених зі сталі марки 40ХН та 40ХН2МА, які свідчать про те, що виконання ЗРК біля виступу ніпеля призводить до зниження умовної межі корозійної втоми з'єднань із сталі марки 40ХН2МА ( $\sigma_{0,2} = 413 \text{ МПа}$ ) на 9% і на 4% – із сталі марки 40ХН ( $\sigma_{0,2} = 502 \text{ МПа}$ ). Авторами [4] робиться висновок про недоцільність застосування зарізьбованих розвантажувальних канавок в замкових різьбових з'єднаннях обважнених бурильних труб.

Американський нафтовий інститут (АНІ) рекомендував використання обважнених бурильних труб із зарізьбованими розвантажувальними канавками на ніпелі та муфті. Ці труби із зарізьбованими розвантажувальними канавками конструкції АНІ широко використовувались в Україні. Але, як свідчить практика, у процесі буріння свердловин роторним способом виникали аварії бурильної колони внаслідок пошкодження замкових різьбових з'єднань ОБТ.

Стендові дослідження різьбових з'єднань ОБТ-178 з кінцевою зарізьбовою розвантажувальною канавкою в муфті вказали на підвищення опору втомі тільки на 12...14%.

Це призвело до того, що ряд іноземних фірм почали виготовляти обважнені бурильні труби з новим профілем зарізьбової розвантажувальної канавки.

Результати досліджень замкового різьбового з'єднання ОБТ-178 з кінцевою зарізьбовою канавкою свідчать, що цей профіль ЗРК збільшує піддатливість з'єднання на 14...15% порівняно із з'єднаннями зі збігом різьби. Дослідженнями [1] встановлено, що кінчна за різьбова канавка на ніпелі знижує напруження в площині першого спряженого витка різьби на 15%.

Як видно з роботи [3], застосування ЗРК кінчної форми в муфті призвело до підвищення межі витривалості замкового з'єднання на 12...14%. Втомні пошкодження також виникали на останньому спряженому витку різьби муфти.

З метою оптимізації геометричних параметрів ЗРК на ніпелі і в муфті були проведені порівняльні втомні дослідження з'єднання для різних співвідношень діаметрів канавок різьбової частини ніпеля та муфти. Різьбові канавки починались безпосередньо від першого спряженого витка різьби. Дослідження проводились за оптимальних значень величин крутних моментів згвинчування.

Комплекс теоретичних досліджень та натурних втомних досліджень дав змогу визначити

оптимальні параметри зарізьбових розвантажувальних канавок на ніпелі та муфті (радіуси галтельних переходів, чистоту поверхні, розміри та ін.) для всього розмірного ряду замкових різьбових з'єднань ОБТ та вибійних двигунів.

Аналіз результатів експериментальних досліджень замкових різьбових з'єднань ОБТ з ЗРК нової конструкції дав змогу встановити зв'язок між розмірами ЗРК на ніпелі та муфті і середнім діаметром різьби в основній площині.

Співвідношення між найменшим діаметром зарізьбової канавки ніпеля  $d_{К.Н.}$  і середнім діаметром різьби в основній площині  $d_{Р.Н.}$  –

$$\frac{d_{К.Н.}}{d_{Р.Н.}} = 0,84...0,89,$$

а найбільшого діаметра зарізьбової канавки муфти  $D_{К.М.}$  і середнього діаметра різьби в площині його першого витка  $D_{Р.М.}$  –

$$\frac{D_{К.М.}}{D_{Р.М.}} = 1,1...1,15.$$

В роботі [3] проведено аналіз експериментальних досліджень, результати якого свідчать про те, що поведінка ЗРК на ніпельній і муфтовій частинах з'єднання збільшує межу витривалості в корозійному середовищі на 57%.

Як свідчать стендові дослідження, конічні різьбові з'єднання з ЗРК, виконані відповідно до певних співвідношень, є рівномірними по його різьбовій частині і циліндричних різьбових канавках. При цьому напруження, що виникають під дією змінних згинаючих навантажень, в перших робочих витках з'єднання і в галтельних переходах його різьбових канавок рівні між собою.

Аналізуючи експериментальні дослідження, можна зробити висновок про переваги ЗРК, які сприяють підвищенню опору втомі різьбових з'єднань. Але у зв'язку з великою різноманітністю замкових різьбових з'єднань, що застосовуються в трубах нафтового сортаменту, та різноманітністю запропонованих форм ЗРК на муфті за відсутності досліджень великих діаметрів з'єднань в корозійному середовищі всі запропоновані форми ЗРК вибирались на основі експериментальних досліджень. Методики розрахунку оптимальних параметрів ЗРК немає.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

У зв'язку з цим викликає інтерес розробка замкового різьбового з'єднання підвищеної піддатливості, вибір форми та оптимальних параметрів нової конструкції ЗРК та виявлення залежності між співвідношенням межі витривалості з'єднання від піддатливості муфтової і ніпельної частин з'єднання.

**Постановка завдання**

Завдання полягає в теоретичному обґрунтуванні форми і оптимальних розмірів ЗРК на ніпельній і муфтовій частинах різьбового з'єднання.

**Основний матеріал дослідження**

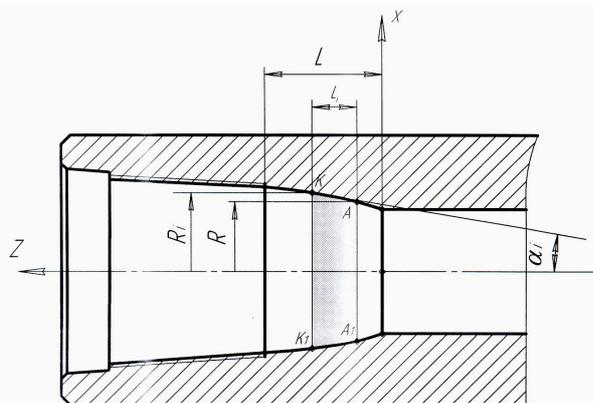
Враховуючи дані попередніх досліджень, а також теоретичне обґрунтування форм поверхонь ЗРК [5, 6], для яких розроблена єдина графоаналітична модель і які є відсіками поверхонь обертання 4-го і 2-го порядків, розглянемо загальний алгоритм розрахунку в інженерних параметрах площ кільцевих ділянок поверхонь ЗРК для розробки раціональних алгоритмів апроксимації поверхонь ЗРК з метою побудови дискретної моделі для задач міцнісних розрахунків.

Площа відсіку поверхні обертання, утвореної обертанням дуги  $AK$  навколо осі  $Z$  (рис. 1), виражається інтегралом

$$S_i = \int_{(K)}^{(A)} 2\pi x ds, \tag{1}$$

де:  $x$  – абсциса кривої  $AK$ ,  
 $ds$  – диференціал дуги  $AK$

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2} dz. \tag{2}$$



**Рисунок 1 – Схема розрахунку площ кільцевих ділянок поверхонь ЗРК в інженерних параметрах**

Координата  $x$  кривої  $AK$  визначається з рівняння твірної лінії; після цього визначається похідна  $\frac{dx}{dz}$ . Знайдені величини підставляються в рівняння (1).

Площа відсіку поверхні обертання

$$S_i = f(R, R_i, L_i, \alpha_i),$$

де:  $R$  – радіус базового перерізу, змінюється в межах  $0 < R < R_i$ ;

$R_i$  – радіус  $i$ -того (ліворуч від базового) перерізу, змінюється в межах  $0 < R < D/2$ ,

$L_i$  – довжина  $i$ -того відсіку, змінюється в межах;

$\alpha_i$  – кут нахилу дотичної (проведеної до твірної в точці  $K$ ) до осі поверхні ЗРК.

Розглянемо окремий випадок, коли вісь твірної кривої другого порядку збігається з віссю муфти [5]. Дістанемо такі можливі поверхні обертання: еліпсоїд, гіперболоїд, параболоїд.

Алгоритм визначення площі відсіку бічної поверхні еліпсоїда обертання і гіперболоїда обертання такий:

1) рівняння твірної лінії [1]

$$x^2 L_i^2 + z^2 (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) + z (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) 2L_i - L_i^2 R^2 = 0; \quad (3)$$

2) з рівняння твірної цих поверхонь (3) визначаємо координату  $x$  дуги  $AK$

$$x_{1,2} = \pm \frac{1}{L_i} \left( - (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) z^2 - 2L_i z (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) + L_i^2 R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Оскільки розрахунок проводиться для позитивної частини відсіку, значення  $x$  беремо додатне.

3) визначаємо похідну за  $z$  від рівняння (4)

$$\frac{dx}{dz} = \left[ -z (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) - L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) \right] \times \left\{ L_i \left[ - (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) z^2 - \right. \right. \quad (5)$$

$$\left. \left. - 2L_i z (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) + L_i^2 R^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{-1}$$

4) визначаємо диференціал дуги  $AK$ , підставивши в рівняння (2) значення  $\frac{dx}{dz}$ , взяті з рівняння (5)

$$ds = \left\{ 1 + \left[ \left[ -z (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) - L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) \right] \times \left( - (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) z^2 - \right. \right. \right. \quad (6)$$

$$\left. \left. \left. - 2L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) z + L_i^2 R^2 \right)^{-1} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

5) площа поверхні обчислюється шляхом підстановки виразів (4) і (6) в рівняння (1)

$$S = 2\pi \int_0^{L_i} \left\{ \frac{1}{L_i} \left[ - (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) z^2 - 2L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) z + L_i^2 R^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[ 1 + \left[ \left[ -z (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) - L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) \right] \times \left( L_i \left[ - (R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2) z^2 - \right. \right. \right. \right. \right. \quad (7)$$

$$\left. \left. \left. \left. - 2L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2) z + L_i^2 R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} dz$$

Введемо такі позначення:

$$m_1 = R_i^2 - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R^2;$$

$$m_2 = 2L_i (R^2 + R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i^2); \quad m_3 = L_i^2 R^2.$$

Тоді рівняння (7) набуде вигляду

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \int_0^{L_i} \left\{ (m_1^2 - L_i^2 m_1) z^2 + (m_1 m_2 - L_i^2 m_2) z + \left( L_i^2 m_3 + \frac{m_2^2}{4} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} dz. \quad (8)$$

Позначимо

$$n_1 = m_1^2 - L_i^2 m_1; \quad n_2 = m_1 m_2 - L_i^2 m_2;$$

$$n_3 = L_i^2 m_3 + \frac{m_2^2}{4}; \quad Z = n_1 z^2 + n_2 z + n_3.$$

Рівняння (8) набуде вигляду

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \int_0^{L_i} \sqrt{Z} dz = \frac{2\pi}{L_i^2} \left[ \frac{(2n_1 z + n_2) \sqrt{Z}}{4n_1} \Big|_0^{L_i} + \frac{4n_1 n_3 - n_2^2}{8n_1} \int_0^{L_i} \frac{dz}{\sqrt{Z}} \right]. \quad (9)$$

Таким чином, проінтегрувавши вираз (9) від 0 до  $L_i$ , отримаємо вираз площі відсіку поверхні еліпсоїда та двопорожнинного гіперболоїда обертання:

– при  $n_1 > 0$

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \left\{ \frac{(2n_1 L_i + n_2) \sqrt{n_1 L_i^2 + n_2 L_i + n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1 n_3 - n_2^2}{8n_1 \sqrt{n_1}} \times \right. \quad (10)$$

$$\left. \times \ln \left[ 2\sqrt{n_1 (n_1 L_i^2 + n_2 L_i + n_3)} + 2n_1 L_i + n_2 \right] - \left[ \frac{n_2 \sqrt{n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1 n_3 - n_2^2}{8n_1 \sqrt{n_1}} \ln(2\sqrt{n_1 n_3} + n_2) \right] \right\}$$

– при  $n_1 > 0$ ,  $4n_1n_3 > n_2^2$

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \left\{ \left[ \frac{(2n_1L_i + n_2)\sqrt{n_1L_i^2 + n_2L_i + n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \times \operatorname{Arsh} \frac{2n_1L_i + n_2}{\sqrt{4n_1n_3 - n_2^2}} \right] - \right. \quad (11)$$

$$\left. - \left[ \frac{n_2\sqrt{n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \operatorname{Arsh} \frac{n_2}{\sqrt{4n_1n_3 - n_2^2}} \right] \right\}$$

– при  $n_1 > 0$ ,  $n_2^2 = 4n_1n_3$ ,  $2n_1z + n_2 > 0$

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \left\{ \left[ \frac{(2n_1L_i + n_2)\sqrt{n_1L_i^2 + n_2L_i + n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \times \ln(2n_1L_i + n_2) \right] - \right. \quad (12)$$

$$\left. - \left[ \frac{n_2\sqrt{n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \ln n_2 \right] \right\}$$

– при  $n_1 > 0$ ,  $n_2^2 = 4n_1n$ ,  $2n_1z + n_2 = 0$

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \left\{ \left[ \frac{(2n_1L_i + n_2)\sqrt{n_1L_i^2 + n_2L_i + n_3}}{4n_1} - \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \times \ln(2n_1L_i + n_2) \right] - \right. \quad (13)$$

$$\left. - \left[ \frac{n_2\sqrt{n_3}}{4n_1} - \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{n_1}} \ln n_2 \right] \right\}$$

– при  $n_1 < 0$ ,  $n_2^2 > 4n_1n_3$ ,  $|2n_1z + n_2| < \sqrt{n_2^2 - 4n_1n_3}$

$$S = \frac{2\pi}{L_i^2} \left\{ \left[ \frac{(2n_1L_i + n_2)\sqrt{n_1L_i^2 + n_2L_i + n_3}}{4n_1} - \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{-n_1}} \times \arcsin \frac{2n_1L_i + n_2}{\sqrt{n_2^2 - 4n_1n_3}} \right] - \right. \quad (14)$$

$$\left. - \left[ \frac{n_2\sqrt{n_3}}{4n_1} + \frac{4n_1n_3 - n_2^2}{8n_1\sqrt{-n_1}} \arcsin \frac{n_2}{\sqrt{n_2^2 - 4n_1n_3}} \right] \right\}$$

Площу відсіку поверхні параболоїда обертання визначаємо так:

1) рівняння твірної лінії [1]

$$x^2 - 2R_i z \operatorname{tg} \alpha_i + R_i(2L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i) = 0; \quad (15)$$

2) з рівняння твірної цієї поверхні (15) визначаємо координату  $x$  дуги  $AK$

$$x_{1,2} = \pm \sqrt{-R_i(2L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i) + 2R_i z \operatorname{tg} \alpha_i}; \quad (16)$$

3) взявши додатні значення  $x$ , визначимо похідну за  $z$  від рівняння (16)

$$\frac{dx}{dz} = \frac{2R_i \operatorname{tg} \alpha_i}{\sqrt{2R_i z \operatorname{tg} \alpha_i - R_i(2L_i \operatorname{tg} \alpha_i - R_i)}}; \quad (17)$$

4) площа поверхні параболоїда обертання визначиться підстановкою виразів (16) і (17) в рівняння (1) та інтегруванням рівняння (1) від 0 до  $L_i$ :

$$S = \frac{2\pi}{3R_i \operatorname{tg} \alpha_i} \left[ \frac{\sqrt{[R_i^2(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i)]^3} - \sqrt{[R_i^2(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i) - 2R_i L_i \operatorname{tg} \alpha_i]^3}}{3} \right]. \quad (18)$$

### Висновки

За виразами (7, 18) визначають в інженерних параметрах площу кільцевих ділянок ЗРК, виконаних у вигляді відповідно еліпсоїда, гіперболоїда чи параболоїда обертання, що уможливило розв'язання різноманітних задач, пов'язаних з проектуванням та побудовою дискретної моделі для задач міцнісних розрахунків.

### Література

1 Щербюк Н.Д. Исследование и разработка конструкций резьбовых соединений труб нефтяного сортамента и забойных двигателей с высокими эксплуатационными характеристиками для бурения глубоких скважин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.10. – М., 1978. – 400 с.

2 Газанчан Ю.И. Исследование усталостной прочности крупных конических резьбовых соединений. Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. – М., 1972. – 163 с.

3 Чернов Б.А. Методы повышения работоспособности бурильных и обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах: Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.10. – Ив.-Фр. 1999. – 345 с.

4 Щербюк Н.Д. Выбор размеров зарезьбовых разгружающих канавок утяжелённых бурильных труб /Н.Д.Щербюк, Ю.И. Газанчан, Б.О.Чернов // Совершенствование техники и технологии буровых работ на нефть и газ. – М.: ВНИИБТ, 1983. – С.138-142.

5 Василюшин В.Я. Теоретичне обґрунтування форм поверхонь зарізьбових розвантажувальних канавок різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту /В.Я.Василюшин : Матеріали 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції [“Нафта і газ України-2000”]. Том 2. Івано-Франківськ: Факел, 2000. – С.297-299.

6 Василюшин В.Я. Графоаналітичне моделювання поверхонь зарізьбових розвантажувальних канавок різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту /В.Я.Василюшин // Нафт. і газ. пром-сть. -1999. - № 36. – С.167-173.

Стаття постуила в редакційну колегію  
16.03.10

Рекомендована до друку професором  
Я.С.Коцкуличем