

- diamond-hard-alloy inserts]. *Naukovi praci Doneckogo nacionalnogo tehnicnogo universytetu. Ser. «Hirnycho-geolohichna» – Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series "Mining and geological"*, 11(161), 9–17 [in Russian].
3. Bondarenko, N.A., Korostyshevskii D.L., Osipov, A.S., & Mechnik, V.A. (2008). Metodika otsiniuvannia robozdatnosti almazno-tverdosplavnikh plastyn za dotychnym napruzhenniam na zriz [Methods for assessing the performance of diamond-carbide plates by tangential shear stress]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovyshch – Exploration and development of oil and gas fields*, 3, 55–58 [in Ukrainian].
 4. Bochkovskii, A. M., & Petriha, P. V. (1993). Sovershenstvovanie tehnologii paiki burovoho instrumenta, osnaschennoho almazno-tverdosplavnyimi platinami. [Improvement of soldering technology of drilling tools equipped with diamond-hard-alloyed inserts]. *Sovershenstvovanie tekhniki i tehnologii bureniia skvazhin – Improvement of well drilling techniques and technology*. (p. 58–60). AN Ukrainy [in Russian].
 5. Stefaniv, B.V. (2013). Osobennosti indukcionnoi paiki almazno-tverdosplavnykh reztsov s lopastiu korpusa sostavnogo burovoho dolota [Peculiarities of induction brazing of diamond-hard-alloy cutters with the blade of a compound drill bit housing]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 8, 50–54 [in Russian].

УДК 622.23.05

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-33-39

М.Є. Чернова, член кор. УНГА, д-р техн. наук¹; **Я.В. Кунцяк**, д-р техн. наук²

¹Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, кафедра загальної та прикладної фізики, Карпатська 15, 76000 Івано-Франківськ, Україна,
e-mail: miracherri1@gmail.com

²НДІКБ бурового інструменту, пр. Палладіна 44, 03680 Київ, Україна,
e-mail: 3312833@ukr.net

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ ОБСАДНИХ КОЛОН

Пошкодження обсадних колон є одним з найбільш серйозних випадків аварій за умов будівництва та експлуатації нафтогазових свердловин. На ліквідацію таких аварій затрачаються значні кошти, що складають майже 35% від вартості будівництва свердловини. До основних видів пошкоджень належить порушення герметичності цих колон. На сьогодні це є 25% від усіх можливих аварій, що стаються з обсадними колонами. Застосування малоефективних герметизуючих мастил, а також відсутність за контролем крутного моменту звинчування обсадних труб є основними причинами порушення герметичності різьбових з'єднань згаданих конструкцій. Наведено аналіз впливу конструктивних параметрів на витривалість і герметичність різьбових з'єднань бурових, обсадних та насосно-компресорних труб. Науково обґрунтовано пружно-деформований стан з'єднання труб зі вставним витком. Розглядається один зі шляхів розроблення конструкції надгерметичних з'єднань тонкостінних труб зі вставним витком. Наведено суть аналітичних досліджень стосовно герметичності конструкції для високих значень тиску й температури. Визначено ймовірність оптимальних параметрів таких конструкцій.

Ключові слова: витривалість, з'єднання, герметичність, обсадна колона.

Задля забезпечення України енергоносіями, які так необхідні нашій державі у часи відбудови та відновлення економічного потенціалу, особливо у повоєнний час, є важливо-необхідним підвищення рівня видобування вуглеводневої сировини, що, у свою чергу, вимагає

збільшення об'ємів бурових робіт та підвищення якості кріплення й довговічності нафтогазових свердловин.

З огляду на це, особливої уваги потребує проблема забезпечення стійкості обсадної колони під час кріплення пластичних порід (зокрема соленосних відкладів), що присутні на родовищах Дніпрово-Донецької западини. Головною особливістю буріння та кріплення в цих умовах є присутність хемогенних відкладів нижньої пермі, що мають дуже агресивні, різні за товщиною прошарки бішофітних відкладів, які в основному й є причиною ускладнень, що відбуваються під час буріння та експлуатації свердловин.

Відомо, що одним з найбільш поширених видів пошкоджень обсадних колон є втрата герметичності їх різьбових з'єднань. Герметичність різьбових з'єднань труб забезпечує їх непроникність за умов навантажень надлишковим тиском рідини чи газу.

Обсадні труби нафтового сортаменту у відповідності до ГОСТ 632-80 (яким компанії користуються й донині) виготовляються з різьбою трикутного і трапецеїдального профілю. Трубопрокатними заводами країни значний відсоток продукції випускається з різьбою трикутного профілю (ОТТМ), яка є негерметичною (так званого безупорного типу), а існуючі ущільнюючі мастила і герметики у своїй більшості не забезпечують герметичності таких з'єднань.

Зазори в різьбі являють собою гвинтові канали і носять назву конструктивних зазорів задля забезпечення задовільного процесу згвинчування і розгвинчування різьбових з'єднань. Розміри конструктивних зазорів у багато разів перевищують висоту виступів на бокових гранях витків різьби, яка визначається чистотою поверхні. Окрім конструктивних зазорів, у довільному різьбовому з'єднанні є зазори технологічного характеру, що визначаються відхиленням параметрів різьби від номінальних, які виникають під час виготовлення, але не виходять за межі технічних умов (ТУ), що перекликаються з ГОСТ 632-80. Конструктивні та технологічні зазори спричинюють негерметичність різьбових з'єднань обсадних труб. Отже, при нарізанні різьб необхідно підвищувати точність виготовлення, а при проектуванні їх конструкцій закладати мінімальні припуски на відхилення від оптимальних значень їх геометричних параметрів.

Оскільки всі труби нафтового сортаменту з'єднуються конічними різьбами, дослідимо зміну кута підймання витка конічної різьби. Для стандартних параметрів конічної гвинтової лінії, яку отримуємо на розгортці витка, за умов переміщення довільної матеріальної точки $M(x, y, z)$ вздовж твірної такої гвинтової лінії, навколо вісі різьби на кут 2π , та переміститься вздовж вісі на величину рівну кроку різьби S . Розгортку гвинтової лінії легко відтворити візуально.

Враховуючи, що кут підймання гвинтової лінії не змінюється і довільна на конусі лінія АВ є прямою, маємо залежність для визначення кута « φ » підймання гвинтової лінії:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{S}{\pi \cdot d}; \quad (1)$$

тут S – крок різьби; d – її діаметр.

Однак, ця залежність задовольняє лише циліндричні різьби, бо в конічних різьбах діаметр змінюється і розгортка має криволінійну форму (опуклу).

Під час проектування конічних різьб та за умов визначення геометричних параметрів у співвідношенні (1) під величиною d розуміють середній діаметр витка різьби, а під φ – середнє значення кута його підймання за виток. Формула (1) призводить до значних похибок у випадку малого діаметру, великого кроку і значної конусності різьби.

Тому наявна спроба вивести рівняння конічної гвинтової лінії, базуючись на основах елементів векторного аналізу, використовуючи обраний деякий параметр ψ як кут повороту навколо вісі OZ, обравши параметр S як крок різьби, α – кут нахилу вектора \vec{r} – твірна від початку координат від вісі OZ (S і $\alpha = \text{const}$).

Вважалося, що довільна точка $M(x, y, z)$, що належить лінії на твірній конічної гвинтової лінії, може мати таке параметричне рівняння лінії:

$$\begin{cases} x = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} \psi \cos \psi; \\ y = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} \psi \sin \psi; \\ z = \frac{S \cdot \psi}{2\pi}; \end{cases} \quad (2)$$

Якщо запишемо вектор-функцію $\vec{r}(t)$, годографом якої є сама гвинтова лінія, співвідношенням:

$$\vec{r}(t) = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} \psi \cos \psi \cdot \vec{i} + \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} \psi \sin \psi \cdot \vec{j} + \frac{S \cdot \psi}{2\pi} \vec{k}; \quad (3)$$

та візьмемо похідну по часу, то отримаємо:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} (\cos \psi - \psi \sin \psi) \vec{i} + \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\pi} (\sin \psi + \psi \cos \psi) \vec{j} + \frac{S}{2\pi} \vec{k}; \quad (4)$$

Кут нахилу вектора $\frac{d\vec{r}}{dt}$ до вісі OZ виражаємо співвідношенням:

$$\cos \gamma = \frac{\frac{dz}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; \quad (5)$$

Підставлення (5) у (4) дає вираз:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{S}{2\pi \sqrt{\frac{S^2}{4\pi^2} \operatorname{tg}^2 \alpha (\cos \psi - \psi \sin \psi)^2 + \frac{S^2}{4\pi^2} \operatorname{tg}^2 \alpha (\sin \psi + \psi \cos \psi)^2 + \frac{S^2}{4\pi^2}}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} + \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \psi^2}}; \end{aligned}$$

Якщо переписати цю залежність так, щоб вона містила лише стандартизовані величини, а також враховуючи, що $\cos \gamma = \cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$, то отримаємо:

$$\sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2 d^2}{S^2} + \frac{1}{\cos^2 \alpha}}}; \quad (6)$$

Відповідно, кут підймання гвинтової лінії опишеться співвідношенням:

$$\varphi = \arcsin \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2 d^2}{S^2} + \frac{1}{\cos^2 \alpha}}}; \quad (7)$$

Слід враховувати, що для циліндричних різьб $\angle \alpha = 0$, тоді

$$\sin \varphi_\varphi = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2 d^2}{S^2} + 1}}; \quad (8)$$

Відмінність співвідношення (7) для визначення кута підймання витка різьби полягає у тому, що окрім геометричних параметрів діаметра d та кроку різьби S , враховується ще й

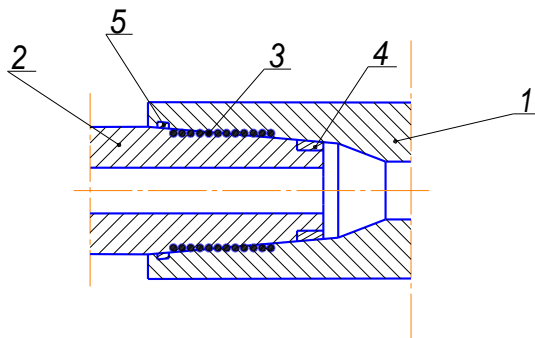
конусність різьби. Застосування отриманого співвідношення дозволяє уточнити розрахунки геометричних параметрів конічних різьб.

З метою підвищення експлуатаційних характеристик обсадних та насосно-компресорних труб під час роботи за умови високих параметрів тиску й температури, а також дії агресивних флюїдів, розроблено конструкції муфтових різьбових з'єднань із вставним спіралевидним елементом [1, 2].

Схема муфтового різьбового з'єднання із вставним елементом наведена на рис. 1. Таке різьбове з'єднання складається з муфти 1 та ніпеля 2. На внутрішній конічній поверхні муфти виконано спіралевидне заглиблення (позиція 3), на зовнішній конічній поверхні ніпеля виконано також спіралевидне заглиблення. У порожнині, що утворена конічними спіралевидними заглибленнями муфти та ніпеля, розміщується вставний конічний спіралевидний елемент, довжина котрого є на 1 виток коротшою за довжину спіралевидних заглиблень муфти й ніпеля. З обох боків спіралевидних заглиблень зроблено так звані стабілізуючі ділянки, що є на внутрішній конічній поверхні муфти та на зовнішній конічній поверхні ніпеля.

Задля підвищення герметичності з'єднання вставний спіралевидний елемент рекомендовано виготовляти із матеріалу, коефіцієнт об'ємного температурного розширення котрого є більшим, аніж у матеріалу муфти та ніпеля. За фізико-механічними властивостями для такої конструкції найбільше підходить бронза марок ОСУ-555 чи БР-ОФ7-02 або БР ОСУ4-4-2,5, так як ці модифікації відзначаються найбільшим коефіцієнтом плинності $\sigma_{0,2}$.

Конічні спіралевидні заглиблення робляться на взаємодіючих конічних поверхнях муфти та ніпеля з конусністю, що є менша за базову на величину відношення діаметра поперечного перерізу вставного спіралевидного елемента до довжини конічної поверхні муфти, чи ніпелю зі спіралевидним заглибленням. Крок спіралевидних заглиблень береться залежно від типорозміру та має межі 1,5–2,5 діаметри від поперечного перерізу вставного спіралевидного елемента.



Схематичне зображення різьбового з'єднання зі вставним спіралевидним елементом

За умови згвинчування такого з'єднання здійснюється припасування вставного спіралевидного елемента у різьбові спіралевидні заглиблення ніпеля та муфти. Разом з тим, через те, що вищенаведені модифікації бронзи у парі зі сталлю відзначаються меншим коефіцієнтом тертя у порівнянні з парою сталь-сталь, на 50%, виникає покращене припрацювання різьби за умови згвинчування-розгвинчування з'єднання.

Задля багаторазового згвинчування-розгвинчування та задля зменшення крутного моменту, кінці спіралевидного елемента фіксуються на краю гвинтового заглиблення торця

муфти у спеціальному заглибленні (рисунок, позиція 5).

Оскільки зі збільшенням глибини бурової свердловини температура середовища зростає, то через те, що матеріал вставного спіралевидного елемента має більший коефіцієнт температурного розширення, аніж матеріал ніпеля та муфти, у радіальному напрямку такого різьбового з'єднання виникають додаткові контактні тиски, що тим самим спричинює його достатньо високу герметичність. Таким чином, підвищення температури середовища сприяє видовженню вставного спіралевидного елемента в різьбовому з'єднанні зазначеної конструкції, і так виникає ущільнення порожнин гвинтоподібного заглиблення у з'єднанні.

Отже, герметичність такого з'єднання залежить від точності його виготовлення, чистоти поверхні, фізико-механічних властивостей матеріалу з'єднання, величини крутного

моменту згинчування, а незначні відхилення від оптимальних значень параметрів елементів різьбового з'єднання спричиняють його негерметичність.

Задля усунення такої ситуації, тобто задля підвищення експлуатаційних характеристик такого типу з'єднання, нами пропонується на стабілізуючій конічній ділянці ніпеля у з'єднанні проводити кільцеве циліндричне проточування (рисунок, позиція 4), куди з додатнім діаметральним натягом встановлюється полімерний герметизуючий елемент [3]. Зовнішній діаметр герметизуючого елемента та його конусність контролюється калібром-кільцем; це забезпечить центрування конічних стабілізуючих ділянок ніпеля та муфти з'єднання з додатнім діаметральним натягом. Через це відбудеться деформація герметизуючого полімерного елемента в кільцевому проточеному полі ніпеля та муфти, що описується теорією тонкостінкових кілець.

Переміщення « w » середини полімерного кільця під дією тиску « P » без краєвих ефектів описується співвідношенням:

$$w = \frac{P}{4\beta^4 D}; \quad (9)$$

тут β – коефіцієнт згасання деформацій, мм^{-1} ; D – коефіцієнт жорсткості матеріалу на згин, Н/мм .

Коефіцієнт жорсткості герметизуючого елемента визначається співвідношенням:

$$J = \frac{E \cdot h}{R^2}; \quad (10)$$

тут E – модуль пружності матеріалу, МПа ; h – товщина стінки герметизуючого елемента в її серединній частині, мм ; R – зовнішній радіус циліндричної поверхні герметизуючого елемента, мм .

Радіальні переміщення герметизуючого елемента, зокрема стінок його внутрішньої поверхні, тобто закон $w = w(x)$ у довільному перерізі пружного тонкостінного кільця, описується співвідношенням четвертого порядку, а саме:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + jw = \Delta P(x); \quad (11)$$

тут $\Delta P(x)$ – різниця внутрішнього та зовнішнього тисків поверхні кільця, що діють перпендикулярно до напрямку серединної поверхні.

Враховуючи те, що герметизуючий елемент має двоконічну форму, а внутрішній тиск, що діє у ніпелі та муфті різьбового з'єднання обсадної колони, є однаковим, то результатом математичних операцій з експериментальними даними для співвідношень (10) та (11) буде співвідношення першого порядку, зокрема:

$$w = \frac{P_{\text{вн}} \cdot R^2}{E \cdot h}. \quad (12)$$

З цього робимо важливий висновок про те, що пружно-деформований стан обидвох конічних поверхонь герметизуючого елемента визначається величиною радіального натягу. Зі збільшенням температури свердловини значний вплив на виникнення так званих додаткових контактних тисків у стабілізуючій ділянці муфти різьбового з'єднання обсадної колони має температурне радіальне розширення конічних поверхонь герметизуючого елемента. Це, у свою чергу, спричинює пружну деформацію самого елемента герметизації та зміну його радіусу на величину:

$$w_R = (\alpha_1 - \alpha_2)TR; \quad (13)$$

тут α_1 – температурний коефіцієнт об'ємного розширення полімерного матеріалу герметизуючого елемента, K^{-1} ;

α_2 – температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу різьбового з'єднання обсадної колони, K^{-1} ; T – температура середовища, К; R – радіус герметизуючого елемента у місці деформації, мм.

Додаткові контактні тиски, що спричиняють деформацію герметизуючого елемента, описуються рівністю:

$$P_K = \frac{E \cdot h}{R} (\alpha_1 - \alpha_2)T. \quad (14)$$

Тож діючий тиск на герметизуючий полімерний елемент, що деформує його, має вираз:

$$P = \frac{P_{en} - R^2}{E \cdot h} + \frac{E \cdot h}{R} (\alpha_1 - \alpha_2)T. \quad (15)$$

Це надає запевнення у тому, що значна різниця у величинах коефіцієнтів температурного об'ємного розширення матеріалу з'єднання обсадної колони та герметизуючого елемента є причиною підвищення контактного тиску в межах вузла герметизації, що, у свою чергу, значно підвищує його герметичність.

Герметизуючий елемент рекомендовано конструювати з полімерів типу фтор-вуглеводень, зокрема марки Ф4М [3], оскільки молекулярна будова таких полімерів задовольняє певні фізико-механічні характеристики з'єднання.

Промислові дослідження довели ефективність такого вузла герметизації обсадної колони.

Висновки

Аналіз конструктивних особливостей різьбових з'єднань обсадної колони призвів до забезпечення шляху вдосконалення технології зміцнення таких різьб.

Таким чином доведено 100% герметизацію різьбового з'єднання обсадної колони в умовах експлуатації за високих температур та тисків.

Експериментальні дослідження довели повну герметичність такого різьбового з'єднання у достатньо широкому інтервалі температур, а багаторазове згвинчування-розгвинчування за наявності фторопластового герметизуючого елемента на ніпелі покращує припрацювання різьби та запобігає в ній появи задирань та заїдань.

Задля застосування такого вузла герметизації в експлуатаційних умовах нами напрацьовано інструктивний матеріал. Також отримано патент на це розроблення. На перспективу є думка про те, що конструкція такої герметизації достатньо проста і надійна, тому вдосконалення не потребує.

М. Chernova¹, Ya. Kuntsiak²

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

²*JSC "Research and Design Company for Drilling Equipment"*

DESIGN FEATURES OF THREADED CONNECTIONS OF CASING COLUMNS

Casing damage is one of the most serious accidents in the construction and operation of oil and gas wells. Considerable funds are spent on the elimination of such accidents, which make up almost 35% of the cost of well construction. The main types of damage include the breach of the tightness of these columns. Today, this is 25% of all possible casing accidents. The use of ineffective sealing lubricants, as well as the lack

of control of the casing pipe screwing torque, are the main reasons for the breach of the tightness of the threaded joints of the mentioned structures. An analysis of the influence of design parameters on the durability and tightness of threaded connections of drilling, casing and pump-compressor pipes is presented. The elastic-deformed state of the connection of pipes with an inserted turn has been scientifically substantiated. One of the ways of developing the design of ultra-hermetic connections of thin-walled pipes with an inserted turn is considered. The essence of analytical studies on the tightness of the structure for high values of pressure and temperature is given. The probability of optimal parameters of such structures is determined.

Key words: endurance, connection, tightness, casing.

Література

1. Резьбовое соединение тонкостенных бурильных труб; пат. 1830409 Росія. Е 21В17/042 № 488116/03 заявл. 02.04.90; опубл.30.07.93. Бюл. № 28.
2. Резьбовое соединение бурильных труб: пат. RU181276U1 E21B17/042 F16L 15/001. №2018113817; заявл.16.04.2018; опубл. 09.07.2018, Бюл. № 19. 8 с.
3. Різьбове з'єднання обсадних та насосно-компресорних труб: пат. 57111 Україна: E21B 17/02 E21B 17/042. №u201009211; заявл. 22.07.2010; опубл. 10.02.2011, бюл. № 3. 4 с.

Надійшла 27.09.23

References

1. Chernov, B.O., Krizhanivski, Ye. I., Dovzhok, Ye. M., Khoma, D.I., Chernov, M.O. (1990). Patent of Russia. №488116/03. E21B17/042. Rezbovoye soyedineniye tonkostennyh burilnyh tryb [Threaded connection of thin-walled drill pipes] (Patent in USSR № 488116/03).
2. Zharennikov, B. S., Purtov, S. L., Kurnev, Ye. M., Dolgih, S. N., Popov, A.Yu. (2018). Patent of Russia №2018113817 E21B17/042 F16L 15/001. Rezbovoye soyedineniye burilnyh tryb [Drill Pipe Threaded Connection] (Patent in Russia № 2018113817).
3. Chernova, M. Ye., Yavorskiy, V. M., Chernov, B. O., Chernov, V. B. (2011) Patent of Ukraine №57111. МПК E21B 17/02 E21B 17/042. Rizbove z'yednannia obsadnyh ta nasosno-kompresornyh trub [Threaded connection of casing and pump-compressor pipes] (Patent Ukraine №57111).

УДК 622.243.95

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-39-49

А.О. Ігнатов, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: A_3000@i.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІСТУ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРОМЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

В роботі виконано деталізоване аналітичне, лабораторне та стендове вивчення головних закономірностей процесів руйнування гірського масиву під впливом різних факторів, а також пошук шляхів ефективного функціонування інноваційних пристроїв комплексного гідромеханічного буріння в гірських породах, які відрізняються за основними показниками фізико-механічних властивостей із наступною розробкою на основі отриманих даних раціонального техніко-технологічного регламенту спорудження свердловин різних груп приналежності із високими організаційно-економічними показниками.

Визначення основних технологічних особливостей вибійних руйнівних процесів, реалізованих при застосуванні пристроїв комбінованого гідромеханічного буріння, виконано за додержання