

9. Borik, M.A., Bublik, V.T., Kulebyakin, A.V., Lomonova, E.E., Milovich, F.O., Myzina, V.A., Osiko, V.V., Seryakov, S.V., Tabachkova, N.Y. (2015). Change in the phase composition, structure and mechanical properties of directed melt crystallized partially stabilized zirconia crystals depending on the concentration of Y_2O_3 . *J. Eur. Ceram. Soc.* 35, 1889–1894.
10. Hannink, R.H.J., Kelly, P.M., Muddle, B.C. (2000). Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 83(3), 461–487.
11. Gaillard, Y., Jiménez-Piqué, E., Soldera, F., Mücklich, F., Anglada, M. (2008). Quantification of hydrothermal degradation in zirconia by nanoindentation. *Acta Mater.* 56(16), 4206–4217.
12. Yang, Y., Luo, L.M., Zan, X., Zhu, X.Y., Zhu, L., Wu, Y.C. (2020). Synthesis of Y_2O_3 -doped WC-Co powders by wet chemical method and its effect on the properties of WC-Co cemented carbide alloy. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 92, 105324.
13. Ratov, B., Mechnik, V., Hevorkian, E., Rucki, M., Pieniak, D., Bondarenko, M., Kolodnitsky, V., Starik, S., Bilorusets, V., Chishkala, V., Sundetova, P., Bektilevov, A., Shukmanova, A., Seidaliyev, A. (2024). Wear resistance of the refractory WC-Co diamond-reinforced 3 composite with zirconia additive. *Materials.* 17(2), 2852.
14. Rucki, M., Hevorkian, E., Latosińska, J.N., Kolodnitskyi, V., Chalko, L., Morozow, D., Samociuk, W., Matijosius, J., Masař, M., Ryba, T. (2025) Reproducibility assessment of zirconia-based ceramics fabricated out of nanopowders by electroconsolidation method. *Appl. Sci.* 15, 4955.
15. Fuertes, V, Cabrera, M. J., Soares, J., Muñoz, D., Fernández, J. F., Enríquez, E. (2019). Enhanced wear resistance of engineered glass-ceramic by nanostructured self-lubrication. *Mater. Des.* 168, 107623.
16. ASTM G99-17 (2017). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.
17. ASTM G171-03 (2017). Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM International, West Conshohocken, PA.

УДК 622.248.3

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-21-27

М.Є. Чернова, доктор технічних наук

Івано-Франківський Національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ, e-mail: myroslava.chernova@nung.edu.ua

РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЗГВИНЧУВАННЯ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БТ ТА ОБТ ЗАДЛЯ БУРІННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

У роботі розглядається одна з проблем безаварійного будівництва глибоких свердловин, яка пов'язана з надійністю різьбового з'єднання елементів бурильної колони. Надійність замкових різьбових з'єднань, у своїй більшості, залежить від величини обертового моменту згвинчування, яким має бути оптимальним.

Дослідження оптимального обертового моменту згвинчування досліджувались на натурних зразках різьбових з'єднань, які піддавались циклічним навантаженням на спеціальному лабораторному обладнанні, при цьому застосовувались тензодавачі, що фіксували величини навантажень не лише на самому різьбовому з'єднанні, а й на найближчих ділянках тіла труби. Таким чином враховувались статичні міцнісні характеристики тіла труби, якими здебільшого завжди науковці нехтували.

На основі лабораторних досліджень, які потребують промислового підтвердження, встановлено межі максимально-допустимих величин обертового моменту згвинчування для різних

типорозмірів замкових різьбових з'єднань задля підвищення їх витривалості в умовах експлуатації глибоких свердловин. Окрім розрахункових співвідношень, що дають можливість розрахувати величину напруження у найбільш небезпечному перерізі конструкції, наведено також результати досліджень, зазначені у відповідних таблицях 1 та 2, для труб різних міцнісних типів за умов різної величини коефіцієнта Пуассона. Уся інформація, зокрема, величина обертового моменту згинчування, у таблицях подається у величині, що відповідає СІ.

Ключові слова: бурова труба, обертовий момент згинчування, різьбове з'єднання.

Під час військової агресії проти України, на превеликий жаль, роботи, пов'язані з будівництвом нафтогазових свердловин, різко скоротились. Причин цьому багато. Тому повоєнне відродження нафтогазового буріння в Україні є одним з пріоритетних завдань. Терміни будуть достатньо короткими, а вимоги до безаварійного буріння – високими. Однією з причин, що викликають аварійний стан бурильної колони (БК), в цілому, є руйнування її різьбових з'єднань. А враховуючи той факт, що свердловини будуть буритися не лише похило-скеровані, але й глибокі та надглибокі, особливої уваги потребує надійність замкових різьбових з'єднань (ЗРЗ), які становлять левову частку в компонуванні БК.

Проблемою міцності та надійності ЗРЗ до сьогодні займалось багато науковців, однак завдання ще не вирішене повністю.

Через значне впровадження високоміцнісних труб, що безпосередньо пов'язане зі зростанням глибин буріння, зростають і вимоги до роботоздатності замкових з'єднань бурильної колони загалом. Статична та динамічна міцність замків, здебільшого визначаються величиною затягування його різьбового з'єднання. Відомі на сьогодні розрахунки обертового моменту згинчування замкового з'єднання, за умови його максимальної витривалості до навантаження, майже не враховують статичної міцності тіла бурильної труби, з якою воно працює. Головна умова таких обчислень полягає у забезпеченні герметичності з'єднання, а це може досягатися за умови контактних навантажень на опираючі торці замків величиною, що становить біля $5 \text{ МН} \times \text{м}^2$.

За проведеними стендовими лабораторними дослідженнями межа витривалості таких замкових різьбових з'єднань є більш ніж у двічі нижчою від з'єднань з контактними навантаженнями на торцях, що становлять майже $400 \text{ кН} \times \text{м}^2$ та більше.

Оптимальне значення контактних зусиль на торці визначається дослідженнями на втомну міцність за умови циклічних знакозмінних навантажень на згин замкових з'єднань довільного діаметру, зокрема від 80 до 203 мм. Опір втомі тих замкових різьбових з'єднань, що містяться у верхній частині бурової колони, визначається за рахунок застосування стендового обладнання, на якому окрім циклічних знакозмінних навантажень на згин, застосовується вплив постійного осьового навантаження, що симулює вагу бурової колони загалом. Найбільший опір втомі спостерігався за умови контактних тисків на опираючі торці, що складала, практично, величину $400 \text{ кН} \times \text{м}^2$.

Ці значення дуже добре узгоджуються з рекомендаціями таких відомих компаній як Британська нафто-газова компанія «Shell» та Французька нафто-сервісна компанія «Schlumberger Limited» [1].

Задля обчислень обертового моменту згинчування замкових різьбових з'єднань бурових труб за основу приймаємо такі умови:

1. Статична міцність замка мусить досягатися з урахуванням міцності на розтяг–стиск тіла труби, як такого;
2. Допущення контактних тисків на опираючі торці мають бути максимальними.

Розрахунки раціонального затягування замкових з'єднань бурових труб полягають у наступному [2, 3]:

- Максимально-допустиме статичне навантаження на бурову трубу визначаємо зі співвідношення:

$$P_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{max}}}{k}; \quad (1)$$

тут P_{max} – максимальне навантаження розтягу, за якого напруження тіла труби досягає межі текучості; k – коефіцієнт запасу міцності, лежить в межах 1,35–1,45.

Обертовий момент згвинчування замкових з'єднань визначаємо співвідношенням:

$$M_{\text{об.згв.}} = a \cdot S_n \cdot \sigma_3; \quad (2)$$

тут a – коефіцієнт, що характеризує конструкцію замкового з'єднання і властивості мастила, що йому відповідає; S_n – площа небезпечного поперечного перерізу ніпеля, що є на віддалі 24 мм від опорного виступу; σ_3 – напруження розтягу у небезпечному перерізі від затягування.

Це максимальне напруження затягування визначаємо з умови:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_T}{1,5} - \sigma_p; \quad (3)$$

тут $\sigma_T = 736$ МПа – межа текучості матеріалу, з якого виготовлений замок; 1,5 – коефіцієнт запасу міцності;

σ_p – напруження розтягу у небезпечному перерізі ніпеля від зовнішнього навантаження $P_{\text{доп}}$.

$$\sigma_p = \frac{P_{\text{доп}} \cdot K_n}{S_n}; \quad (4)$$

тут K_n – коефіцієнт зовнішнього навантаження ніпеля під час розтягу [1].

Обертові моменти згвинчування, розраховані зі співвідношення (3), сприяють забезпеченню максимального, для відповідного типу бурових труб, контактного напруження на торцях різьби. Але, їх величина не може перевершувати допустимі навантаження на торці, що задовільняють нерівність:

$$\sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \leq \frac{\sigma_T}{1,2} = \frac{736 \cdot 10^6}{1,2} = 613 \text{ МПа};$$

тут 1,2 – коефіцієнт запасу міцності на торцях.

Допустимо можливий обертовий момент згвинчування розраховуємо з наступної умови:

$$M_{\text{об.згв.}}^T = a \cdot \sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \cdot S_{\text{тор}}; \quad (5)$$

тут $S_{\text{тор}}$ – площа опираючих торців.

У якості раціонального обертового моменту згвинчування, який є здатним забезпечити статичну і динамічну міцність, застосовуємо найменшу з двох величин, що розраховані за співвідношеннями (2) та (5).

Розраховані величини значень раціональних $M_{\text{об.згв.}}$ (відповідно до Держстандарту) для основних розмірів замків до бурових труб, наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Розраховані величини значень обертових моментів згинчування замкових різьбових з'єднань бурових труб–

Тип ЗРЗ	Бурова труба		Обертвий момент згинчування, Н×м	
	Діаметр, ×10 ⁻³ , м	Група міцності	μ=0,1	μ=0,13
1	2	3	4	5
ЗН-80	60,3	Д,К,Е,Л,М	2844,5÷3138,9	3727,5÷4021,7
ЗН-95	73,0	Д	8828,1÷9122,4	11378,4÷11770,8
		К	8435,7÷9122,4	10789,9÷11770,8
		Е	7847,2÷9122,4	10103,3÷11770,8
		Л	7258,7÷8730,01	9220,5÷11182,3
		М	6572,0÷8239,6	8337,7÷10495,6
ЗН-108	89,0	Д,К,Е,Л,М	8828,1÷9416,6	11476,5÷12065,1
ЗН-113	89,0	Д	14026,9÷14223,1	18048,6÷18244,74
		К	12751,7÷14223,1	16381,03÷18244,7
		Е	12261,3÷14026,9	15694,4÷18048,6
		Л	11280,4÷13536,4	14517,3÷16842,1
		М	10397,5÷12751,7	13340,24÷16381,03
ЗН-140	114,3	Д,К,Е,Л,М	19127,6÷19421,8	24522,5÷24914,9
ЗН-172	139,7	Д,К,Е,Л,М	43944,3÷4434,8	56401,8÷56892,2
ЗН-197	168,3	Д	67289,7÷68564,9	86319,2÷87888,6
		К	63464,2÷65033,7	81316,6÷83376,5
		Е	61894,8÷63464,2	79256,7÷81316,6
		Л	58657,8÷60913,9	75136,9÷78079,6
		М	55715,1÷57971,2	71409,5÷74352,2
ЗШ-108	73,0	Д	9220,5÷9416,6	119866,0÷12163,2
		К	8435,7÷9416,6	10888,0÷12163,2
		Е	7945,3÷9416,6	10201,4÷11967,0
		Л	7258,7÷8828,1	9318,6÷11280,4
		М	6570,0÷8335,1	8435,7÷10691,8
ЗШ-118 ЗШК-118	89,0	Д,К,Е,Л,М	9612,8÷9907,1	12357,3÷12653,6
ЗШ-133 ЗШК-133	101,3	Д	17558,1÷19029,5	22462,6÷24326,3
		К	15890,6÷17754,3	20402,7÷22855,0
		Е	15204,0÷17263,8	19421,8÷22168,3
		Л	14026,9÷16383,0	17950,5÷20991,3
		М	12555,5÷15400,1	16086,8÷19814,2
ЗШ-146	114,3	Д	22756,9÷23149,2	29418,0÷2971,2
		К	21279,0÷23142,2	27269,7÷29712,2
		Е	20494,5÷23142,2	26280,1÷29712,2
		Л	18827,5÷22553,8	24122,8÷28927,7
		М	17062,4÷21279,0	21867,4÷27260,7
ЗШ-178 ЗШК-178	139,7	Д	42852,2÷43342,5	54913,6÷55502,0
		К	42754,2÷43342,5	54717,5÷55502,0
		Е	41185,2÷43342,5	52854,3÷55502,0
		Л	38537,6÷43048,3	49461,5÷55109,7
		М	36184,1÷40989,1	46382,4÷52462,1

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5
ЗУ-86	60,3	Д,К,Е,Л,М	3137,9÷3432,1	4020,5÷4314,6
ЗУ-108 ЗУК-108	73,0	Д	9413,8÷10198,2	11963,3÷13140,0
		К	8433,2÷9708,0	10884,7÷12453,6
		Е	7952,7÷9413,8	10198,2÷11963,3
		Л	7256,4÷8825,4	9315,7÷11576,9
		М	6570,0÷8335,1	8433,2÷10688,5
ЗУ-120 ЗУК-120	89,0	Д	13336,2÷13630,3	17160,5÷17454,7
		К	13140,0÷13630,3	16866,3÷17454,7
		Е	12453,6÷13630,3	15885,7÷17454,7
		Л	11178,8÷13630,3	14316,8÷17454,7
		М	9904,0÷13434,2	12747,8÷17160,5
ЗУ-146 ЗУК-146	114,3	Д,К,Е,Л,М	21573,2÷21965,4 20396,5÷21965,4	27751,0÷28143,2 26182,0÷28143,2
ЗУ-155 ЗУК-155	127,0	Д; К	25299,5÷25593,7	32555,9÷32850,1
		Е	25201,4÷25593,7	32457,9÷32850,1
		Л	23240,2÷25593,7	29810,2÷32850,1
		М	21457,1÷25299,5	27456,8÷32457,9
		Зу-185	139,7	Д,К,Е,Л,М

Проведені стендові дослідження на втому на натурних замкових з'єднаннях стабілізованих обважнених бурових труб (ОБТС) засвідчили, що їх опір втомі, у своїй основі, визначається обертовим моментом згвинчування ($M_{об.згв}$) і за раціональної величини межа міцності є максимальною.

Для більшості з'єднань оптимальний обертовий момент згвинчування досягається за напружень у небезпечному перерізі ніпеля, що відповідає співвідношенню $\sigma_z = (0,3...0,4)\sigma_T$, тоді на опірних торцях контактне напруження становитиме величину в межах 342–441 МПа, за умови $\sigma_T = 636–736$ МПа.. Як є зрозуміло за результатами досліджень, за умови підвищення величини σ_z у ніпелі до значення, що становить $0,7\sigma_T$, межа витривалості замкових різьбових з'єднань суттєво спадає на величину, що складає 10% від її максимального значення.

Відомим є той факт, що правильно обрані значення обертового моменту згвинчування ($M_{об.згв}$) для різьбових з'єднань ОБТС підвищують надійність їх роботи, у тому числі запобігаючи явищу дозатягування під час буріння.

Максимальна величина обертового моменту згвинчування ОБТС визначається за співвідношенням:

$$M_{об.згв}^{max} = a \cdot \sigma_z^{max} \cdot S_n;$$

тут

$$\sigma_z^{max} = \frac{\sigma_T}{1,5};$$

тут 1,5 – коефіцієнт запасу міцності.

Залежно від умов експлуатації ОБТ, величина обертового моменту згвинчування визначається за співвідношенням:

$$M_{об.згв} = a \cdot S_n \cdot \sigma_z = a \cdot S_n \cdot (0,4...0,6)\sigma_T;$$

Максимально допустимі навантаження на торці визначаються за умовою:

$$\sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \leq \frac{\sigma_{\tau}}{1,2};$$

тут 1,2 – коефіцієнт запасу міцності на торцях; для ОБТС – $\sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \leq \frac{637 \text{ МПа}}{1,2} \approx 530 \text{ МПа}$; для

$$\text{ОБТ} – \sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \leq \frac{441 \text{ МПа}}{1,2} \approx 367,5 \text{ МПа};$$

Допустима величина обертового моменту згвинчування, за можливостей на торці, визначається за співвідношенням:

$$M_{\text{об.зв}}^{\tau} = a \cdot \sigma_{\text{тор}}^{\text{доп}} \cdot S_{\text{тор}}.$$

Обертовий момент згвинчування, рекомендований для основних типорозмірів ОБТС та ОБТ, наведено нижче у таблиці 2.

Таблиця 2. Рекомендовані обертові моменти згвинчування для різьбових з'єднань ОБТ

Тип та діаметр ОБТ, $\times 10^{-3}$ м	Момент затягування, Н \times м	
	$\mu=0,1$	$\mu=0,13$
$\sigma_{\tau}=637$ МПа		
ОБТС2-108	5785,5÷7746,7	7256,4÷10198,2
ОБТС2-120	8040,9÷11963,3	10198,2÷15297,4
ОБТС2-133	12453,6÷18729,5	15885,7÷23828,6
ОБТС2-146	17454,7÷23534,4	22259,6÷30006,4
ОБТС2-178	30790,8÷46088,2	39420,1÷58836,0
ОБТС2-203	46578,5÷62758,4	59620,5÷80409,2
ОБТС2-223	64131,2÷86587,0	82174,3÷110807,8
ОБТС2-254	76486,8÷114730,2	98060,0÷147090,0
ОБТС2-273	76486,8÷115220,5	98060,0÷148070,6
ОБТС2-299	77173,2÷115808,9	99432,8÷100217,3
$\sigma_{\tau}=441$ МПа		
ОБТ-146	13630,3÷17258,6	17552,7÷22161,6
ОБТ-178	27652,9÷30987,0	35301,6÷39224,0
ОБТ-203	46774,6÷47068,8	58836,0÷60306,9

Мінімальне значення затягу розраховане за умови, а максимальне – за умови $\sigma_{\tau} = 0,6\sigma_{\tau}$; з урахуванням допустимих контактних тисків на опірні торці.

Висновки

Проведеними стендовими дослідженнями на опір втомі ЗРЗ шляхом знакозмінних циклічних навантажень, що складали 10^6 циклів, отримано закономірності для розрахунку оптимальних значень обертового моменту згвинчування ЗРЗ, зокрема, встановлено, що 1) найбільше значення обертового моменту згвинчування відповідає найменшій товщині стінки бурової труби; 2) під час експлуатування замкових з'єднань типу ЗН-80, ЗН-95, ЗШ-108, ЗУ-108, ЗУК-108, ЗУ-120, ЗУК-120 ($\sigma_{\tau}=735,75$ МПа) з буровими трубами марки Л та М рекомендується обмежити допустимі навантаження розтягу–стиску на тіло труби до 50%; 3) наведені дослідження потребують промислових підтверджень, які можливо буде провести у мирний, стабільний час.

M. Je. Chernova

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

CALCULATION OF RATIONAL BENDING MOMENTS OF LOCKING THREADED CONNECTIONS BT AND WDP FOR DRILLING DEEP WELLS

The paper considers one of the problems of safe construction of deep wells, which is related to the reliability of threaded connections of drill string elements. The reliability of locking threaded connections, for the most part, depends on the value of the screwing torque, which must be optimal. The optimal screwing torque was studied on full-scale samples of threaded connections, which were subjected to cyclic loads on special laboratory equipment.

During the research, strain gauges were used that recorded the load values not only on the threaded connection itself, but also on the nearest parts of the pipe body. Thus, the static strength characteristics of the pipe body, which have mostly always been neglected by scientists, were taken into account.

Based on laboratory studies that require industrial confirmation, the limits of the maximum permissible values of the screwing torque for different sizes of lock threaded connections have been established in order to increase their durability in the conditions of operation of deep wells. In addition to the calculation ratios that make it possible to calculate the stress value in the most dangerous cross-section of the structure, the results of the studies specified in the corresponding tables 1 and 2 are also given for pipes of different strength types under conditions of different values of the Poisson's ratio. All information, in particular, the value of the screwing torque in the tables is given in values corresponding to SI.

Key words: *drill pipe, screwing torque, threaded connection.*

Література

1. Drilling Dynamics. Sensors and Optimization *Schlumberger*. URL: https://www.enhanced-drilling.com/enhanced-drilling-technologies?utm_term=oil+drilling+technology&utm_campaign=02.
2. Розробка та експлуатація нафтових та нафтогазових родовищ / М.І Фик та ін.; ред. М.І. Фик. Харків, 2019. 149 с.
3. Василюшин В. Я. Підвищення працездатності різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2013. – 20 с.

Надійшла 04.05.25

References

1. *Drilling Dynamics. Sensors and Optimization*. (b. d.). Schlumberger. https://www.enhanced-drilling.com/enhanced-drilling-technologies?utm_term=oil+drilling+technology&utm_campaign=02.
2. Fyk, M. I., Khripko, O.I., Raevskii, Ya.O., & Varavina, O.P. (2019). *Rozrobka ta ekspluatatsiia naftovykh ta naftohazovykh rodovyshch. [Development and exploitation of oil and gas fields]* (M/I Fyk, Ed.) [in Ukrainian].
3. Vasilishin V. Ya. (2013). *Pidvyshchennia pratsezdatnosti rizbovykh ziednan trub naftovoho sortamentu. [Improving the performance of threaded connections of oil pipelines]* [Extended abstract of candidate's thesis]. Ivano-Frankivsc [in Ukrainian].