

## ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МУФТОВОГО З'ЄДНАННЯ ОБСАДНИХ ТРУБ З ГЕРМЕТИЗУЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ СВЕРДЛОВИНАХ

<sup>1</sup>В.М.Яворський, <sup>2</sup>М.Є.Чернова, <sup>2</sup>Б.О.Чернов

<sup>1</sup> ГПУ "Львівгазвидобування", 79044, м. Львів, вул. Газопромислова, 8, тел. (03222) 87717,  
e-mail: Yavorski.home@gmail.com

<sup>2</sup> ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 48090;  
e-mail: public@nung.edu.ua

*Запропонована конструкція муфтового з'єднання обсадних та теплонагнітальних труб з герметизуючим елементом для забезпечення герметичності обсадних та теплонагнітальних колон за високих параметрів тиску і температур. Одержано аналітичні залежності для визначення контактних тисків і деформацій, які виникають на конічних ущільнюючих ділянках герметизуючого елемента і муфти під дією контактного внутрішнього тиску і температури. Визначено граничнодопустимі значення контактних тисків в герметизуючому вузлі з'єднання. Подано результати експериментальних досліджень натурних зразків обсадних труб на герметичність, які підтвердили високі експлуатаційні характеристики з'єднань з різьбою ОТТГ.*

*Предложена конструкция муфтового соединения обсадных и теплонагнетательных труб с герметизирующим элементом для обеспечения герметичности обсадных и теплонагнетательных колон при высоких параметрах давлений и температур. Выведены аналитические зависимости для определения контактных давлений и деформаций, возникающих на конических уплотнительных участках герметизирующего элемента и муфты под воздействием контактного внутреннего давления и температуры. Определены гранично-допустимые значения контактных давлений в узлах герметизации соединения. Приведены результаты экспериментальных исследований на герметичность натурных образцов ОТ, подтверждающих высокие эксплуатационные характеристики соединений ОТТГ.*

*During the casing operation under the conditions of the increased temperature and pressure, the elements of the clutch coupling are effected by great static and dynamic stresses, thermal cyclic loadings that lead to the elastic and plastic deformations of the section of the coupling, pipes and sealing elements that influence the hermiticity and the endurance of the casing and heat flow pipes.*

*The structure of the highly-hermetic threaded casing joint with the sealing element has been suggested. The analytical dependences for the estimation of the deformation magnitude that appear on the tapered surfaces of the sealing element and coupling under internal contact pressure and temperature have been received. The maximum safe contact pressures in the unit of the joint sealing have been determined. The results of the experimental investigation that proved the high hermeticity of the casing with the suggested clutch coupling have been introduced.*

Багато малодобітних родовищ нафти стають неперспективними для їх використання, тож, виникає необхідність у інтенсифікації притоку нафти з колектора. Видобування в'язких парафіністих нафт також пов'язане зі значними труднощами. Для розв'язання цих проблем останнім часом все ширшого застосування набувають теплові методи (внутріпластове горіння, закачування теплоносіїв у пласт). У зв'язку з впровадженням у нафтову промисловість методу термічної дії на продуктивний пласт виникає проблема подавання теплоносія на глибину 2000÷4000 м.

Необхідною умовою є подавання теплоносіїв на проектну глибину з мінімальними втратами температури і тиску, оскільки температура теплоносія, яким діють на нафтовий пласт, повинна бути достатньо високою.

Дуже часто як нагнітальні використовують експлуатаційні свердловини, а для закачування теплоносія в пласт – звичайні обсадні труби.

Під час транспортування теплоносія експлуатаційною колоною на труби та різьбові з'єднання діє температура до 620÷670°C при

тисках 30÷45 МПа, а, точніше, циклічні зміни. Крім того, на колону діють статичні та динамічні навантаження, а також фреттинг-корозія, які впливають на міцнісні характеристики колони та герметичність різьбових з'єднань. Отже, виникає питання щодо розроблення внутрісвердловинного обладнання, яке б володіло високими міцнісними характеристиками та герметичністю.

Обсадні труби нафтового сортименту у відповідності з ГОСТ-632-80\* виготовляються з різьбою трикутного та трапецевидного профілю (ОТТМ, ОТТГ). Експериментальні дослідження натурних зразків з'єднань обсадних труб з різьбою ОТТМ виявили, що така конструкція різьби безупорного типу не забезпечує високої герметичності різьбових з'єднань обсадних труб і, відповідно, довговічності свердловин.

Для забезпечення герметичності обсадних колон у ВНДІБТ розроблено конструкції з'єднань ОТТГ [1], які відрізняються від ОТТМ наявністю ущільнюючого пояса біля торця труби, а також тим, що це – з'єднання упорного типу.

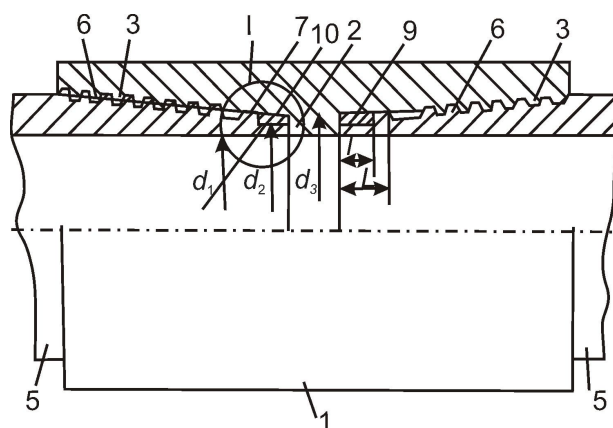


Рисунок 1 – Схема з'єднання обсадних труб з різьбою ОТТПГ

Теоретичні і експериментальні дослідження виявили, що герметичність з'єднань з різьбою ОТТПГ забезпечується за наявності додатнього осьового натягу між поверхнею ущільнюючого пояса і відповідною поверхнею муфти та шляхом опирання торців труби в опорні уступи муфти під дією крутного моменту згвинчування. Промислові дослідження з'єднань ОТТПГ виявили, що в процесі згвинчування і розгвинчування часто виникають задири вздовж ущільнюючих конічних поверхонь, що вимагає зменшення величини діаметрального натягу, що, у свою чергу, призводить до зменшення герметичності різьбових з'єднань.

З метою підвищення герметичності та експлуатаційної надійності обсадних колон під час роботи в умовах підвищених тисків та температур розроблено конструкцію високогерметичного з'єднання з різьбою трапецевидного профілю (ОТТПГ) [2]. Схема запропонованої конструкції різьбового з'єднання труб зображена на рис.1.

Основною відмінністю запропонованого різьбового з'єднання від ОТТПГ є те, що на конічній ущільнюючій поверхні ніпельної частини з'єднання виконується кільцеве циліндричне проточування, у яке з діаметральним натягом розміщують герметизуючий елемент, виготовлений із матеріалу, коефіцієнт об'ємного температурного розширення якого більший, ніж матеріалу муфти і труби ( бронза ОСЦ-555; Бр ОФ7 - 0,2; Бр ОЦС4 - 4 - 2,5; Бр ОЦС4 - 4 - 4 тощо).

Оптимальні геометричні параметри та технологія кріплення здійснюється згідно з [2].

До різьбового з'єднання входить муфта 1 з двостороннім уступом 2 в середній частині конічної різьбової ділянки 3 і конічні ущільнюючі поверхні 4 з боку уступа та ніпеля 5 з відповідними муфтою і конічною різьбою та конічною ущільнюючою ділянкою 7 з кільцевим проточуванням 8 для посадки герметичного елемента 9. Зовнішня поверхня герметизуючого елемента 10 має конічну форму, що відповідає конічній ущільнюючій поверхні 4. Кільцеве проточування виконується на торці ніпеля, в результаті чого торець герметизуючого елемента взаємодіє з торцем уступа муфти.

Під час загвинчування різьбового з'єднання оптимальним крутним моментом здійснюється щільна посадка на конічні ущільнюючі поверхні поверхонь герметизуючого елемента з початковим діаметральним натягом  $\Delta_{поч}$ , що призводить до виникнення значних напружень і, як наслідок, деформації муфти, ніпеля та герметизуючого елемента. З підвищенням температури через відмінність між коефіцієнтами об'ємного розширення матеріалів виникають додаткові контактні тиски між поверхнями, що взаємодіють, тому для вибору раціональних параметрів елементів з'єднання слід проводити аналітичні дослідження його деформованого стану.

Під час згвинчування різьбових з'єднань з додатнім діаметральним натягом  $\Delta_3$  радіус муфти збільшується на величину  $w_m$ , а радіус труби зменшується на величину  $w_T$ , що можна відобразити таким співвідношенням:

$$w_m + w_T = \Delta_3. \quad (1)$$

Для обсадних труб і муфт встановлено (3), що їх деформації під дією тиску описуються моментною теорією тонкостінних кругових оболонок. Переміщення  $w$  середньої поверхні муфти чи труби під дією тиску  $P$  без крайового ефекту тиску становить:

$$w = \frac{P}{4\beta^4 D}, \quad (2)$$

де:  $\beta$  – коефіцієнт затухання деформацій, 1/мм;  
 $D$  – коефіцієнт жорсткості стінки на згин, Н/мм.

Тут

$$\beta = 4\sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{R^2 \cdot h^2}}; \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (3)$$

де:  $E$  – модуль пружності матеріалу, МПа;  
 $h$  – товщина стінки, мм;  
 $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  
 $R$  – радіус середньої поверхні, мм.

Відповідно, коефіцієнт жорсткості оболонки (ущільнюючого пояса):

$$j = \frac{E \cdot h}{R^2}. \quad (4)$$

Радіальні переміщення внутрішньої поверхні стінки  $w = w(x)$  в будь-якому перерізі  $x$  пружної тонкостінної оболонки пов'язані між собою диференціальним рівнянням четвертого порядку [4]

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + jw = P(x), \quad (5)$$

де  $P(x)$  – еквівалентний тиск, що відповідає різниці внутрішнього і зовнішнього тисків на поверхнях оболонки і діє у напрямку перпендикулярно до серединної поверхні.

Оскільки герметизуючий елемент (рис. 1) має конічну форму, то товщина стінки  $h$  і радіус серединної поверхні  $R$  є лінійнозмінними вздовж осі  $x$ :

$$h = x \cdot tg\varphi, \quad (6)$$

де:  $k = tg\varphi$  – тангенс кута нахилу твірної конуса до осі;

$x$  – координата даного перерізу, мм.

Підставивши (3), (4) і (6) в рівняння (5), отримаємо диференціальне рівняння четвертого порядку зі змінними коефіцієнтами для визначення радіальних переміщень  $w$  в будь-якому перерізі конічного ущільнюючого елемента різьбового з'єднання ОТТПГ:

$$\frac{E \cdot k^3}{12(1 - \mu^2)} \frac{d^2}{dx^2} \left( x^3 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Ek}{R^2} x \cdot w = P(x). \quad (7)$$

Оскільки конічні поверхні герметизуючого елемента на ніпелі і відповідні конічні поверхні муфти з'єднані з натягом, то зовнішній тиск на ущільнюючий елемент не діє. Еквівалентний тиск в даному випадку рівний різниці контактного тиску по конічних поверхнях за рахунок додаткового натягу та внутрішнього тиску. Аналітичні дослідження виявили, що контактний тиск  $P_{кг}$ , який виникає в ущільненні за рахунок натягу, не достатній для створення пружних деформацій зі зміною геометричних розмірів елементів герметизуючого вузла і відповідно, еквівалентний тиск  $P(к)$  рівний внутрішньому тиску  $P_{вн}$ .

Для спрощення виразу позначимо:

$$\rho^4 = \frac{12(1 - \mu^2)}{R^2 \cdot k^2}. \quad (8)$$

Після підстановки (8) в рівняння (7) та відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left( x^2 \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left( x^2 \frac{dw}{dx} \right) \right] \right) + \rho^4 w = \frac{P_{вн} R^2}{E \cdot k \cdot x}. \quad (9)$$

Враховуючи, що внутрішній тиск, який діє на різьбові з'єднання обсадної колони постійний, то згідно [5] рівняння (9) має такий частковий розв'язок:

$$w = \frac{P_{вн} \cdot R^2}{E \cdot h}. \quad (10)$$

Як бачимо [5], із загального розв'язку рівняння (9) випливає, що пружно-деформований

стан конічної частини герметизуючого елемента повністю визначається радіальним натягом на конічних ущільнюючих поверхнях, тобто

$$w = \Delta. \quad (11)$$

Внаслідок підвищення температури у свердловині муфта, ніпель і герметизуючий ущільнюючий елемент нагріваються і отримують температурне радіальне розширення. Оскільки коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу герметизуючого елемента більший, ніж матеріалу різьбового з'єднання, то на конічних поверхнях і торцях ніпеля і муфти виникають значні контактні тиски, які пружно деформують герметизуючий елемент і зменшують його на величину:

$$w_k = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T \cdot R, \quad (12)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти об'ємного температурного розширення матеріалу герметизуючого елемента і з'єднання.

Зміна геометричних параметрів герметизуючого елемента відбувається внаслідок виникнення на конічній поверхні додаткового контактного тиску

$$P_k = \frac{E \cdot h}{R} (\alpha_1 - \alpha_2) T. \quad (13)$$

Відповідно, сумарний тиск, який діє на герметизуючий елемент і викликає його пружну деформацію:

$$P = \frac{P_{вн} \cdot R^2}{E \cdot h} + \frac{E \cdot h}{R} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T. \quad (14)$$

Зовнішня поверхня герметизуючого елемента має конічну форму, яка відповідає конічній ущільнюючій поверхні муфти. Діаметр зовнішньої конічної поверхні 10 герметизуючого елемента 9 в розрахунковій площині вибирається з такого виразу:

$$d_3 = d_2 \times \left\{ \left( E_2 \cdot \left[ \frac{\pi \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{P_k} + \frac{\Delta n}{P_k \cdot d_2} - \frac{1}{E_1} \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} - \mu_1 \right) + \mu_2 \right] - 1 \right) \times \left( E_2 \cdot \left[ \frac{\pi \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{P_k} + \frac{\Delta n}{P_k \cdot d_2} - \frac{1}{E_2} \left( \frac{1 + K^2}{1 - K^2} - \mu_1 \right) + \mu_2 \right] - 1 \right)^{-1} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

де:  $d_1$  – внутрішній діаметр ніпеля, мм;

$d_2$  – внутрішній діаметр герметизуючого елемента, мм,

$$K = \frac{d_1}{d_2}; \quad (16)$$

$P_k$  – контактний тиск на взаємодіючих конічних ущільнюючих поверхнях герметизуючого елемента і муфти, МПа;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти лінійного розширення відповідно герметизуючого елемента і матеріалу муфти та ніпеля,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\Delta T$  – перепад температури,  $^\circ\text{C}$ ;

$E_1, E_2$  – модулі пружності відповідно матеріалу герметизуючого елемента і матеріалу муфти та ніпеля, МПа;

$\mu_1, \mu_2$  – коефіцієнти поперечної деформації відповідно для матеріалу герметизуючого елемента і матеріалу муфти та ніпеля;

$\Delta n$  – початковий діаметральний натяг конічних ущільнюючих поверхонь герметизуючого елемента і муфти, мм.

Значення контактного тиску залежить від геометричних характеристик з'єднання, а також матеріалу, з якого виготовлено герметизуючий елемент.

Отже, різниця між коефіцієнтами об'ємного температурного розширення матеріалів герметизуючого елемента та муфти і ніпеля різьбового з'єднання ОТТПГ забезпечує підвищення контактного тиску в ущільненні у разі підвищення температури у свердловині, а, відповідно, і гарантовану високу герметичність обсадної та теплоагнітальної колон.

При згвинчуванні різьбового з'єднання ОТТПГ торець ніпеля опирається в упорний уступ муфти. З підвищенням температури внаслідок лінійного розширення герметизуючого елемента на упорних торцях виникає додатковий контактний тиск та підвищується герметичність різьбового з'єднання. Згідно теоретичних розрахунків, запропонована конструкція з'єднання забезпечує герметичність до тисків, за яких виникає залишкова пластична деформація металу та розрив вздовж різьби.

Для підтвердження результатів аналітичних досліджень проведено експериментальні дослідження на герметичність натурних зразків муфтових з'єднань обсадних труб діаметром 168 мм з різьбою ОТТГ та ОТТПГ із сталі групи міцності Д і Е.

Тиск створювався пристроєм УНГР-3000, а як робоча рідина була використана трансформаторна олива. Герметизуючий елемент на ніпельній частині з'єднання був виготовлений з бронзи ОСЦ-555 з діаметральним натягом 0,5 мм. Різьбові з'єднання згвинчувались з рекомендованим крутним моментом 9000 Н·м та 12000 Н·м. Дослідження проводились в інтервалі температур  $293 \div 640^\circ\text{K}$ .

Аналіз результатів досліджень виявив, що муфтові з'єднання обсадних труб з різьбою ОТТГ за температури  $293^\circ\text{K}$  та  $593^\circ\text{K}$  залишаються герметичними до тисків  $38 \div 39$  МПа, з різьбою ОТТПГ за температури  $293^\circ\text{K}$  порушення герметичності відбувалося при тиску  $57 \div 58$  МПа, а за температури  $393^\circ\text{K}$  і вище різьбові з'єднання ОТТПГ залишилися герметичними аж до критичних тисків, тобто тисків, за яких виникає залишкова пластична деформація матеріалу труб.

При згвинчуванні та розгвинчуванні муфтових з'єднань з різьбою ОТТПГ задирів та подряпин на конічній поверхні герметизуючого елемента виявлено не було. Це пояснюється

тим, що коефіцієнт тертя бронзи зі сталлю на 50 % менший, ніж сталь зі сталлю.

Крім того, як видно з формули (4), під час виготовлення циліндричної поверхні для герметизуючого елемента зменшується коефіцієнт жорсткості, а податливість, відповідно, підвищується по всій довжині конструкції з герметизуючим елементом.

Оскільки в свердловинах середня температура  $320 \div 340^\circ\text{K}$ , то обсадні труби з різьбою ОТТПГ забезпечують герметичність обсадних колон, а відповідно підвищують їх надійність та довговічність у ході експлуатації.

Під час розроблення внутрішньосвердловинного обладнання для закачування теплоносія в пласт використано конструкцію різьбового з'єднання ОТТПГ. Промислові випробовування в свердловині Гнідинці № 1 підтвердили високі експлуатаційні характеристики труб з різьбою ОТТПГ.

### **Висновки**

1. На основі результатів даних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено конструкцію муфтового з'єднання обсадних труб, що забезпечує високу герметичність обсадних та теплоагнітальних колон.

2. Досліджено пружно-деформований стан муфтового з'єднання обсадних труб при термодинамічних процесах. На основі аналізу результатів даних визначено раціональні параметри герметизуючого вузла, які забезпечують герметичність та підвищують надійність і довговічність колони.

### **Література**

1 ГОСТ 632-80 Трубы обсадные и муфты к ним: Технические условия. – М.: Госстандарт, 1980. – 66 с.

2 А.С. №1663174А1, СССР, МКИ Е 21 В 17/02, 17/042, F. 16L 15/00. Резьбовое соединение теплоагнетательных труб. / Б.А. Чернов, И.С.Бабюк, К.А. Оганов, Я.Б. Чернов – № 4498291/03, заявл. 01.08.88, опубл. 15.07.91, Бюл. №26.

3 Чернов Б.О., Кулинин Т.М., Палійчук І.І. Деформації елементів муфтового з'єднання обсадних труб з герметизуючою втулкою // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 4(5). – С. 56-60.

4 Тимошенко С.П., Вейновський-Кригер С. Пластинки и оболонки. – М.: Наука, 1961 – 636 с.

5 Палійчук І.І., Кулинин Т.М. Пружно-деформований стан тонкостінного герметизуючого елемента муфтових різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 3(4)-С.73-78.

*Стаття постуила в редакційну колегію*  
28.05.09

*Рекомендована до друку професором*  
**Мойсишиним В.М.**