

ФОРМУВАННЯ ГЕРМЕТИЗУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ ВУЗЛА УЩІЛЬНЕННЯ МУФТОВИХ З'ЄДНАНЬ ОБСАДНИХ ТРУБ ТИПУ ОТТГ

I.I. Палійчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 44277,
e-mail: public@nung.edu.ua

Контактний тиск у вузлі ущільнення та різьбі муфтових з'єднань обсадних труб ОТТГ залежать від радіальних натягів, товщин стінок, внутрішніх і зовнішніх тисків, осевих навантажень. Контактний тиск в ущільненні більший при більших натягах, товщинах стінок і менших діаметрах труб. Внаслідок вигину стінок труби виникає спад тиску до торця ущільнення, який зростає під дією внутрішнього тиску, що впливає на герметичність. Зменшивши товщину і збільшивши гнучкість стінок у вузлі ущільнення можна зменшити цей спад та взаємний вплив різних натягів в ущільненні і різьбі. Розрахунок товщин стінок і натягів забезпечує більший та рівномірний контактний тиск в ущільненні і підвищення герметичності з'єднань ОТТГ у заданих умовах експлуатації.

Ключові слова: герметичність, обсадна труба, різьбове з'єднання, ущільнення, контактний тиск, деформація стінки.

Контактное давление в узле уплотнения и резьбе муфтовых соединений обсадных труб ОТТГ зависят от радиальных натягов, толщин стенок, внутренних и внешних давлений, осевых нагрузок. Контактное давление в уплотнении больше при больших натягах, толщинах стенок и меньших диаметрах труб. Вследствие изгиба стенок трубы возникает спад давления к торцу уплотнения, который возрастает под действием внутреннего давления, что влияет на герметичность. Уменьшив толщину и увеличив гибкость стенок в узле уплотнения можно уменьшить этот спад и взаимное влияние различных натягов в уплотнении и резьбе. Расчет толщин стенок и натягов обеспечивает большее и равномерное контактное давление в уплотнении и повышение герметичности соединений ОТТГ в заданных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: герметичность, обсадная труба, резьбовое соединение, уплотнение, контактное давление, деформация стенки.

The article deals with the enhancement of impermeability of threaded joints of casing pipes by means of construction improvement of seal assembly and programming of their working capacity parameters taking into account operational loadings. The computer-generated model of the elastic-deformed state of pipe and coupling joint with seal assembly is designed on the basis of the moment theory of short cylinders with variable thickness of their walls, Lamé's formulas and the formula of contact pressure found by the author. Analytical studies of contact pressures dependence on radial tension, thicknesses of walls, internal and external pressures, thrust load have allowed to determine new influencing patterns of constructional and operational factors on leakproofness of threaded joints of casing pipes with seal assembly.

Keywords: tightness, casing pipe, threaded socket joint, seal assembly, contact pressure, wall deformation.

Високі технічні показники при кріпленні свердловин мають муфтові з'єднання з конічною трапецієвидною упорною різьбою і вбудованим вузлом ущільнення типу "конус-конус". Вони показали високу ефективність у складаних гірничо-технічних умовах. Найбільш перспективним напрямком забезпечення герметичності обсадних колон є муфтові з'єднання з вузлами ущільнень, які широко застосовують у світовій практиці. Проте, такі з'єднання типу ОТТГ потребують високої точності виготовлення для одночасного забезпечення міцності різьби та герметичності вузла. Відхилення на виготовлення з'єднань ОТТГ, які допускає існуючий стандарт, значно знижують їх надійність.

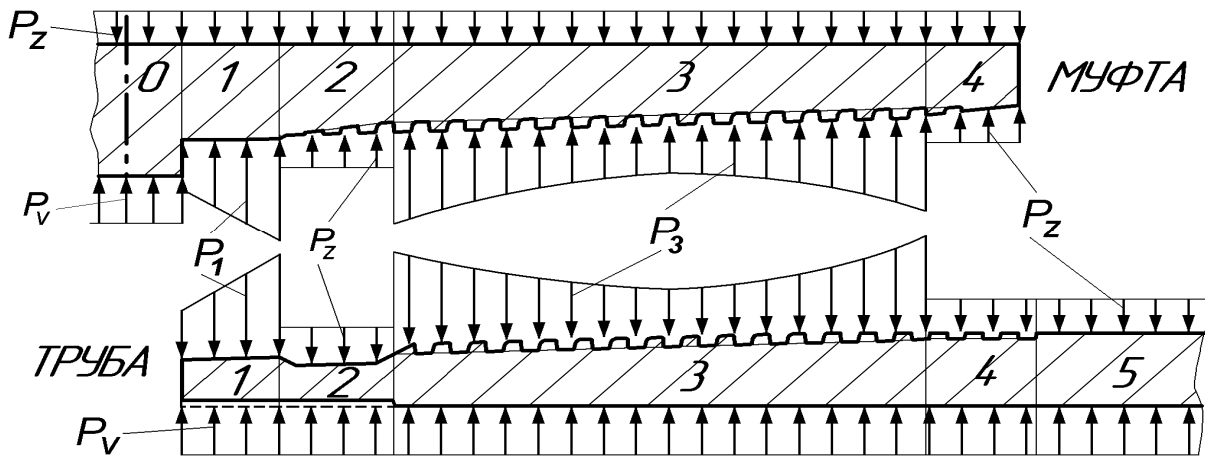
Герметичність ущільнення і міцність різьби цих з'єднань залежать від силової взаємодії контактних і неkontaktних ділянок муфти і труби. Відомі моделі напружено-деформованого стану муфтових з'єднань обсадних труб використовують спрощені розрахунки за формулами Ламе, які не враховують вигини стінок змінної товщини, і моментної теорії довгих циліндрів постійної товщини, які не розкривають закономірності утворення і розподілу контактних тисків у з'єднанні.

Аналітична модель з'єднання обсадної труби і муфти з вузлом ущільнення

Муфта і труба ОТТГ описуються як сукупність конструктивно подібних ділянок зі змінною товщиною стінки, а їх геометричні параметри виражаються лінійними функціями у власних координатах ділянки і у загальній системі координат з'єднання [1-2]. При згинчуванні труба пружно розтискає муфту, а муфта пружно стискає трубу за рахунок радіальних натягів Δ_1 в ущільненні і Δ_3 у різьбі. Тому на їх контактних поверхнях утворюються контактні тиски P_1 в ущільненні і P_3 у різьбі (рис. 1), від чого радіуси ділянок муфти збільшуються, а труби – зменшуються.

У свердловині діють експлуатаційні чинники: внутрішній P_V і зовнішній P_Z тиски (рис. 1), осьове навантаження Q , які змінюють пружно-деформований стан з'єднання. Тиск P_V діє зсередини і збільшує радіус ділянок труби, а тиск P_Z діє на муфту ззовні і зменшує її радіус. Від цієї дії контактні тиски P_1 і P_3 зростають.

Внаслідок змінної товщини і жорсткості стінок радіальні деформації (вигини) w стінок муфти і труби та контактні тиски P_1 і P_3 нерів-



експлуатаційні тиски: P_v – внутрішній, P_z – зовнішній;
 контактні тиски: P_1 – в ущільненні, P_3 – у різьбі

Рисунок 1 – Схема взаємодії ділянок муфти і труби у з'єднанні ОТТГ під дією тисків

номірні вздовж ділянок. Радіальні зміщення w стінки ділянки знаходять з розв'язку основного диференційного рівняння моментної теорії 4-го порядку зі змінними коефіцієнтами [1-2]

$$\frac{R^2}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{S} \frac{d^2}{dx^2} \left(S^3 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + w = \frac{R^2 P}{ES}, \quad (1)$$

де: S – товщина стінки, лінійно змінна; R – серединний радіус стінки; P – тиски, зведені до серединної поверхні; x – координата перетину; E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона.

Розв'язок однорідного рівняння (1), коли права частина рівна нулю, відомий і визначається за функціями Бесселя [1-2].

Внаслідок вигинів w у стінці виникають: v – кут повороту перетину, M – згинальний момент, N – поперечна сила, які визначають за похідними [3]. Ці параметри описують вигини стінки, зумовлені лише крайовим обпиранням, тобто дією на неї вигинів суміжних ділянок у їх крайових перетинах.

За методикою проф. С.П.Тимошенка для моментної теорії пластинок і оболонок знайдено вираз радіальних зміщень w^* стінки під дією контактної тиску P_K [3]. Ця дія викликає у перетині x стінки поворот v^* , згинальний момент M^* і поперечну силу N^* , які за моментною теорією теж отримуємо диференціюванням.

Інтегруючи основне рівняння (1), знайдено загальний вираз контактної тиску P_K , який виникає на контактних ділянках муфти і труби, з'єднаних з натягом, з лінійно змінною товщиною стінок (в ущільненні і у різьбі). Також знайдені параметри w_0, v_0, M_0 у стінці від дії постійного тиску P_0 [3].

У результаті повний пружно-деформований стан стінки кожної i -тої ділянки описується сумою відповідних деформаційних і силових параметрів w, v, M, N

$$A_i(x) = a_i + a_i^* + a_{0i}, \quad (2)$$

де: $A_i(x)$ – сумарний деформаційний чи силовий параметр (один з w, v, M, N); a_i – параметр (w, v, M, N) від вигинів сусідніх ділянок; a_i^* –

відповідний параметр від контактної тиску (w^*, v^*, M^*, N^*); a_{0i} – відповідний параметр від експлуатаційного тиску (w_0, v_0, M_0).

За принципом рівноваги кожного параметра у спільному крайовому перетині i -тої та j -тої ділянок для усіх таких перетинів з'єднання (рис. 1) складена система лінійних рівнянь виду

$$A_i(x_{i,j}) = A_j(x_{j,i}) \rightarrow$$

$$\rightarrow a_{i,j} + a_{i,j}^* - a_{j,i} - a_{j,i}^* = -a_{0i,j} + a_{0j,i}. \quad (3)$$

В ущільненні і у різьбі пружна радіальна взаємодія стінок муфти і труби одна на одну однакова за величиною і протилежна за напрямком. Тому умовою рівноваги контактних тисків вздовж контактної ділянки є такий вираз

$$P_m(x_m) + P_t(x_t) = 0, \quad (4)$$

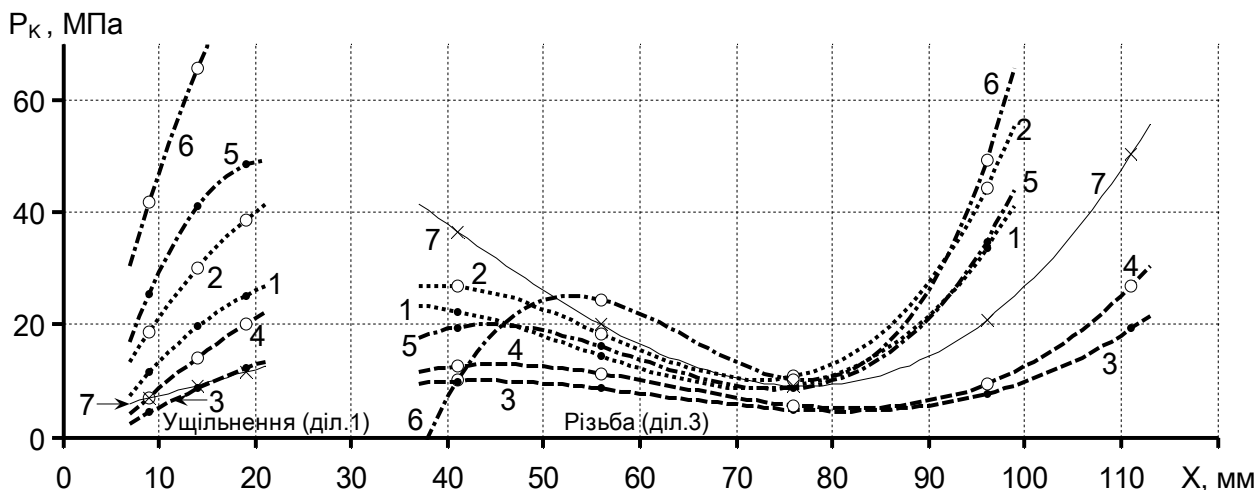
де: x_m і x_t – координати перетину з'єднання у власних системах відліку муфти і труби; P_m і P_t – контактний тиск, розрахований окремо для муфти і труби.

Системи координат муфти і труби протилежні. Тому аргументи x_m і x_t виразили через X у спільній системі координат з'єднання, а функції P_m і P_t розклали у ряд Тейлора відносно середини контактної ділянки за похідними. Із них отримані рівняння системи, необхідні для визначення коефіцієнтів контактних тисків.

При згвинчуванні муфти і труби радіальні натяги Δ в ущільненні і різьбі компенсуються розширенням W_m стінки муфти та звуженням W_t стінки труби. Тому сума радіальних зміщень стінок муфти W_m (додатніх) і труби W_t (від'ємних) у з'єднанні дорівнює радіальному натягу Δ вздовж контактної ділянки. Умова балансу радіальних деформацій і натягу є такою:

$$W_m(x_m) - W_t(x_t) = \Delta. \quad (5)$$

Рівняння (5) математично цілком аналогічне (4). Для нього теж застосовують розклад функцій у ряд Тейлора, але тут функції радіальних зміщень стінок W згідно з (2) мають три доданки. Звідси отримують решту необхідних рівнянь системи.



1, 2, 5, 6 – D=168 мм; 3, 4, 7 – D=245 мм; 1, 3, 5 – S=8,9 мм; 2, 4, 6, 7 – S=12 мм;
натяги (мм): в ущільненні: 1...4, 7 – Δ1=0,1; 5, 6 – Δ1=0,2; у різьбі: 1...6 – Δ3=0,1; 7 – Δ3=0,2

Рисунок 2 – Розподіли контактних тисків P_к в ущільненні (діл. 1) і різьбі (діл. 3) з’єднань ОТТГ залежно від діаметрів D, товщин стінок S труб та натягів Δ₁ і Δ₃

Ділянки з’єднання ОТТГ не є тонкостінними. Зміщення W контактних поверхонь відбувається за рахунок кільцевих (тангенційних) деформацій, які враховує моментна теорія (1), і радіальних зміщень шарів по товщині стінки, які враховує теорія Ламе. Тому формули Ламе перетворили так, щоб фактичні деформації поверхонь розрахувати як добуток деформацій серединної поверхні і знайдених коефіцієнтів зміщення контактної поверхні відносно серединної по товщині.

Це зроблено для контактних поверхонь ущільнення і різьби (α=0,5 tg φ):

– зміщення внутрішньої поверхні муфти під дією контактного і зовнішнього тисків

$$w_v = \frac{P_v R_v^2 R_z}{E S R} \left(\frac{1-\mu}{2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{R_z^2}{R_v^2} \right) - \frac{P_z R_z^2 R_v}{E S R} \left(\frac{1-\mu}{2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{R_v^2}{R_z^2} \right) = \frac{P_v R^2}{E S} \left(\frac{1-\mu}{2} (1-\alpha x)^3 + \frac{1+\mu}{2} (1-\alpha x)(1+\alpha x)^2 \right) - \frac{P_z R^2}{E S} (1-\alpha x)(1+\alpha x)^2; \quad (6)$$

– зміщення зовнішньої поверхні труби під дією контактного і внутрішнього тисків

$$w_z = \frac{P_v R_v^2 R_z}{E S R} \left(\frac{1-\mu}{2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{R_z^2}{R_v^2} \right) - \frac{P_z R_z^2 R_v}{E S R} \left(\frac{1-\mu}{2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{R_v^2}{R_z^2} \right) = \frac{P_v R^2}{E S} (1+\alpha x)(1-\alpha x)^2 - \frac{P_z R^2}{E S} \left(\frac{1-\mu}{2} (1+\alpha x)^3 + \frac{1+\mu}{2} (1-\alpha x)^2 (1+\alpha x) \right); \quad (7)$$

Отже, аналітична модель пружно-деформованого стану з’єднань муфт і труб типу ОТТГ розроблена на основі моментної теорії коротких циліндрів зі стінками змінної товщини у поєднанні з формулами Ламе. Вона дає змогу врахувати закономірності утворення контактних тисків на ділянках ущільнення і різьби та сумісність кільцевих, радіальних і згинальних деформацій, які виникають у їх стінках при згинчуванні з радіальним натягом, під дією контактних і експлуатаційних тисків та осевих навантажень. Вона програмно реалізована у комп’ютерній системі програмування MatLab.

Формування герметизуючої здатності вузла ущільнення з’єднань ОТТГ

Герметизуюча здатність вузла ущільнення ОТТГ повністю визначається контактним тиском на його поверхнях, який залежить від ряду конструктивних і технологічних чинників.

На основі програмної моделі з’ясовано, що розподіли контактних тисків є нерівномірними вздовж ділянок 1 і 3 (рис. 1). Від натягу у різьбі муфта стискає трубу, але ненавантажені стінки ділянок 2 і 4-5 чинять опір і вигинаються. Стінки труби повертаються досередини так, що тиск P_к посередині різьби зменшується (рис. 2). В ущільненні 1 стінка труби теж стискається. Але стінка канавки 2, стиснена на краях, вигинається назовні і повертає стінку в ущільненні 1 досередини. Тому тут контактний тиск спадає до торця труби (рис. 2). Цей спад є визначальним для герметичності ущільнення.

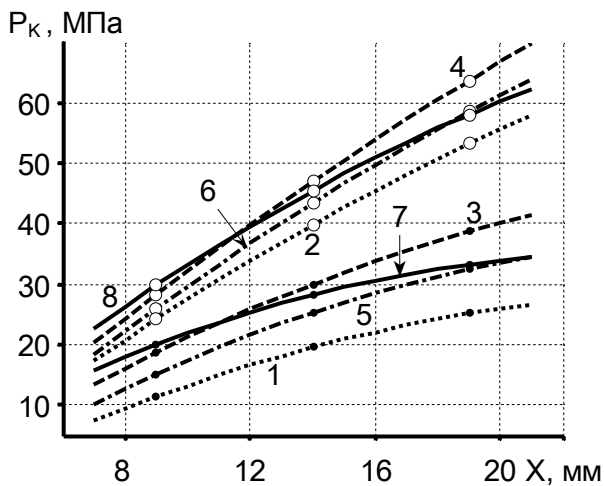
Контактний тиск P_к більший у труб більшої товщини, які жорсткіші і чинять більший опір стисканню (рис. 2: лінії 1-2, 3-4). Менша відносна товщина стінок труб більшого діаметра зменшує контактний тиск P_к (лінії 1-3, 2-4).

Контактний тиск P_к більший, якщо більші натяги в ущільненні Δ₁ (рис. 2: лінії 1-5, 2-6) та у різьбі Δ₃ (лінії 4-7). Більший тиск P_к збільшує

деформації стінок контактних ділянок 1 і 3, що впливає на суміжні ділянки і викликає їх деформації.

Деформації від ущільнення до різьби і навпаки передаються через деформації стінки канавки 2. Внаслідок більшого натягу ущільнення Δ_1 радіус труби на ділянці 2 звужується, що зменшує тиск P_K на перших витках різьби (лінії 5-6). Більший вплив має товщина стінки канавки (лінії 2-6). Тонша стінка є більш гнучкою, звуження компенсує згином, тому створює менший вплив (лінії 1-5). Аналогічно більший натяг різьби Δ_3 зменшує тиск P_K в ущільненні (лінії 4-7). Таким чином, встановлено, що зменшенням товщини стінки ділянки 2 канавки можна зменшити взаємний вплив відхилень натягів на герметичність ущільнення і міцність різьби.

Внутрішній тиск P_V зсередини розтискає трубу (рис. 1), тому контактні тиски P_K зростають як у різьбі, так і в ущільненні (рис. 3: пари ліній 1-2, 3-4, 5-6). При цьому тонша стінка труби розтискається більше, що збільшує приріст контактного тиску під дією внутрішнього (різниця між лініями 2-1 проти 4-3).



1, 2 – ОТТГ 168 x 8,9; 3...8 – ОТТГ 168 x 12;
 1, 3, 5, 7 – $P_V=0$; 2, 4, 6, 8 – $P_V=20$ МПа;
 3, 4 – стандартні товщини $t_1=7,8$ і $t_2=8,1$;
 зменшені товщини у межах допуску:
 5, 6 – до $t_1=6,3$ і $t_2=6,6$; 7, 8 – лише $t_2=6,6$
 (натяги $\Delta_1=\Delta_3=0,10$ мм)

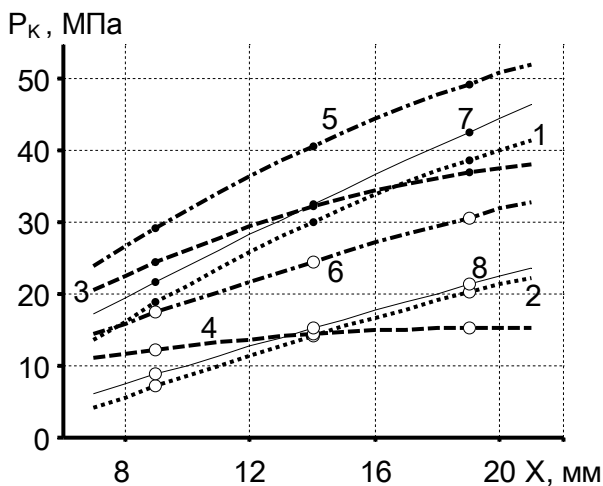
Рисунок 3 – Розподіл контактних тисків P_K в ущільненні з'єднань ОТТГ залежно від внутрішнього тиску P_V та товщини труби (мм) в ущільненні t_1 і канавці t_2

Герметичність ущільнення залежить від контактного тиску P_K і внаслідок його спадання визначається меншою величиною P_K біля торця труби. Менша товщина труби створює менший тиск P_K в ущільненні, тому з'єднання є герметичним при меншому внутрішньому тиску (лінії 2 проти 4). Тому герметичність з'єднань ОТТГ зменшується навіть від допустимого стандарту зменшення товщин стінок прокатаних труб у межах допуску $-12,5\%$ (лінії 6 проти 4).

Проте зменшення товщини стінки лише ділянки канавки 2 зменшує взаємний вплив виги-

нів стінок труби. Тому під дією внутрішнього тиску контактний P_K в ущільненні зростає біля торця і стає рівномірнішим (лінії 3-7, 4-8). Це дозволяє збільшити допустимий внутрішній тиск або зменшити натяг і тертя в ущільненні.

Зовнішній тиск P_Z стискає муфту (рис. 1), тому контактні тиски P_K у з'єднанні зростають. Але через гвинтові зазори у різьбі він проникає у канавку 2 і стискає стінку труби. Тому біля канавки контактний тиск P_K в ущільненні зменшується (рис. 4: лінії 1-3, 2-4). Стінка труби більшої жорсткості чинить більший опір зовнішньому тиску P_Z і забезпечує більшу герметичність (різниця між 1-3 проти 2-4).



1, 3, 5, 7 – ОТТГ 168 x 12;
 2, 4, 6, 8 – ОТТГ 245 x 12;
 1, 2 – без навантаження ($P_V=0$, $P_Z=0$, $Q=0$);
 3, 4 – зовнішній тиск $P_Z=10$ МПа;
 5, 6 – одночасна дія тисків $P_V=P_Z=10$ МПа;
 7, 8 – дія осьової сили $Q=500$ кН

Рисунок 4 – Розподіл контактних тисків P_K в ущільненні залежно від зовнішнього тиску P_Z , одночасної дії тисків P_V і P_Z та осьової сили Q

Одночасне підвищення внутрішнього P_V і зовнішнього P_Z тисків створює таке ж зростання контактних тисків P_K (рис. 4: лінії 1-5, 2-6). Тому герметичність з'єднання визначається саме різницею надлишкових тисків. При цьому приріст контактного тиску в ущільненні ОТТГ навіть дещо більший за приріст діючих тисків.

Під дією осьового розтягу муфта і труба звужуються (тим більше, чим менша поперечна площа). Звуження муфти створює приріст контактного тиску P_K в ущільненні (рис.4: лінії 1-7, 2-7). Оскільки трапецієвидна різьба міцна, то осьове стискання з'єднання розширює муфту, зменшує тиск P_K і знижує герметичність.

Загалом менша товщина стінок труб створює менші контактні тиски у з'єднанні ОТТГ під дією експлуатаційних навантажень, тому їх герметичність дещо нижча. Проте зменшення товщини стінки у канавці 2 у межах допуску знижує взаємний вплив деформацій ділянок з'єднання і створює приріст контактного тиску в ущільненні. Отже, розрахунком співвідно-

шення відповідних товщин стінок і натягів у з'єднаннях ОТТГ за допомогою розробленої програмної моделі можна забезпечити більший або більш рівномірний контактний тиск в ущільненні та герметичність з'єднань ОТТГ при заданих експлуатаційних навантаженнях.

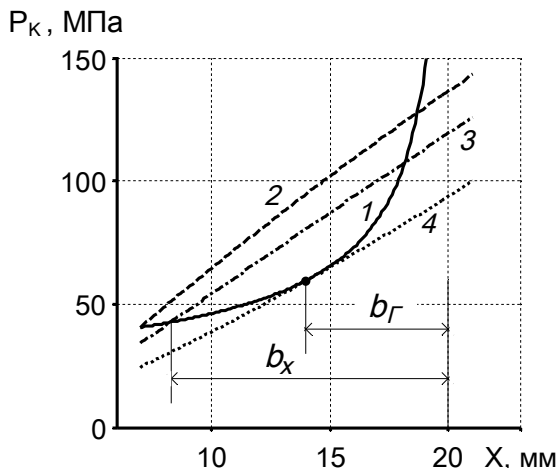
На основі цієї моделі розроблено методику підвищення надійності герметизації з'єднань ОТТГ. Надійна герметичність ущільнення забезпечується, якщо контактний тиск P_K перевищує величину P_T необхідного тиску герметизації, розраховану за формулою [4]

$$P_K \geq P_T = k_1 \frac{c + k_2 P}{\sqrt{b}}, \quad (8)$$

де: P – робочий тиск середовища, МПа; b – ширина ущільнення, см; c, k_1, k_2 – параметри герметизації (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри герметизації вузла ущільнення [4]

Матеріал ущільнення:	c	k_2
сталь, тверді сплави	3,5	1
чавун, латунь, бронза	3,0	1
алюміній і його сплави, поліетилен, вініпласт	1,8	0,9
гума середньої твердості, пластикат поліхлорвініловий	0,4	0,6
Середовище:		k_1
рідини		1
газоподібні середовища (повітря, пара, природний газ)		1,4
середовища з високою проникною здатністю (водень, гелій, газ)		1,8



1 – графік необхідного тиску P_T герметизації (8) для робочого тиску $P = 42,7$ МПа; розподіли контактних тисків P_K при натягах: 2 – $\Delta_1 = 0,21$ мм; 3 – $\Delta_1 = 0,16$ мм; 4 – $\Delta_1 = 0,08$ мм; b_G – ширина герметичного контакту; b_x – ширина щільного контакту, де $P_K > P$ (ОТТГ 168 x 12; натяг у різьбі $\Delta_3 = 0,25$ мм)

Рисунок 5 – Визначення необхідних натягів Δ_1 в ущільненні з'єднань ОТТГ

Для визначення необхідного натягу в ущільненні програмно будують графіки контактних тисків P_K в ущільненні (рис. 5) та необхідного тиску герметизації P_T для заданого робочого тиску P . За ними визначають мінімальний натяг $\Delta_{1Г}$, при якому виконується умова (8).

На основі аналізу можливих відхилень при виготовленні муфти і труби складено рівняння утворення мінімального натягу при згвинчуванні з'єднання

$$\Delta_{1\min} = 0,12 - \varepsilon_m + \varepsilon_t \geq \Delta_{1Г}. \quad (9)$$

За умовою (9) встановлюють допустимі відхилення поверхонь ущільнення муфти ε_m і труби ε_t , які гарантують перевищення мінімального натягу над необхідним.

Висновки

Розроблена програмна модель пружно-деформованого стану з'єднань обсадних труб типу ОТТГ дозволяє визначати контактні тиски і деформаційно-силові параметри на контактних і неконтактних ділянках муфти і труби.

Закономірності впливу конструктивних і експлуатаційних чинників на герметичність різьбових з'єднань ОТТГ показали, що контактні тиски в ущільненні і різьбі значною мірою залежать від натягів, товщин і жорсткості стінок, діаметрів труб, внутрішніх і зовнішніх тисків, осевих навантажень та від поєднання і зміни цих чинників. Встановлено, що в ущільненні контактний тиск спадає до упорного торця, що має визначальний вплив на герметичність з'єднань ОТТГ.

Отримані закономірності дозволяють визначити напрямки підвищення надійності з'єднань ОТТГ у процесі проектування та виготовлення, що забезпечує підвищення їх працездатності в умовах експлуатаційних навантажень, які діють на обсадну колону у свердловині.

Література

- 1 Крижанівський Є.І. Фізико-математичні основи розрахунку взаємодії муфт і труб у з'єднаннях нафтогазового сортаменту / Є.І.Крижанівський, І.І.Палійчук // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2008. – № 2 (18) – С. 56-59.
- 2 Крижанівський Є.І. Метод розрахунку контактного тиску для муфти і труби, з'єднаних з натягом / Є.І.Крижанівський, І.І.Палійчук // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 1 (6) – С. 78-82.
- 3 Палійчук І.І. Пружна взаємодія з'єднаних з натягом циліндрів зі змінною товщиною стінки / І.І.Палійчук // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 2 (19) – С. 59-63.
- 4 Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А.Кондаков, А.И.Голубев и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 09.06.11

Рекомендована до друку професором Векериком В.І.