

ДЕФОРМАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ МУФТОВОГО З'ЄДНАННЯ ОБСАДНИХ ТРУБ З ГЕРМЕТИЗУЮЧОЮ ВТУЛКОЮ

Б.О.Чернов, Т.М.Кулинин, І.І.Палійчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 49350
e-mail: public@ifdtung.if.ua

В муфтовых соединениях обсадных труб с герметизирующей втулкой детали взаимодействуют участками с определенным натягом и контактным давлением. Выведены функции влияния, описывающие радиальные перемещения стенки цилиндра в зависимости от длины участка, его расположения и расстояния до свободного торца. С их помощью методом наложения определены деформации участков муфты, трубы и втулки. Для них составлены уравнения баланса натяга и деформаций в соединении под действием контактного, внешнего или внутреннего давления и температуры. В них учтена особенность деформаций конических концов труб и втулки с переменной толщиной стенки, от которых зависит натяг в уплотнении. Система уравнений балансов однозначно описывает моментное упруго-деформированное состояние муфты, трубы и втулки.

The parts of coupling connections of the casing pipes with hermeticable plug are interacting by the sections with the definite strain and contacts pressure by the screw. They are concluded the influences functions, which are describing the radial displacement of the cylinders wall depending on the length of the section, on its position and distance to the free edge. With help of these functions and their compositions they are defined the radial deformations of the couplings, pipes and plugs sections. For them they are compiled the balances equations for the strain and deformations under the effect of the contacts, outside or inside pressure and temperature. They take into account the deformations peculiarity of the conical pipes and plugs endings with the variable wallthickness, what on is depended the strain in their solidity. The balance equations system is synonymous described the moments elastic unformed status of the assembled coupling, pipes and plug.

Для герметизації муфтових з'єднань обсадних колон застосовують спеціальну втулку [1]. При згвинчуванні на різбових поверхнях муфти і труби забезпечують радіальний натяг Δ_3 , необхідний для міцності з'єднання. Внаслідок цього радіус муфти збільшується на величину w_m , а радіус труби зменшується на w_m так [2, 3], що

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

Одночасно на конічних поверхнях втулки і труб (рис. 1) створюється радіальний натяг Δ_k , за рахунок якого відбувається ущільнення і герметизація з'єднання.

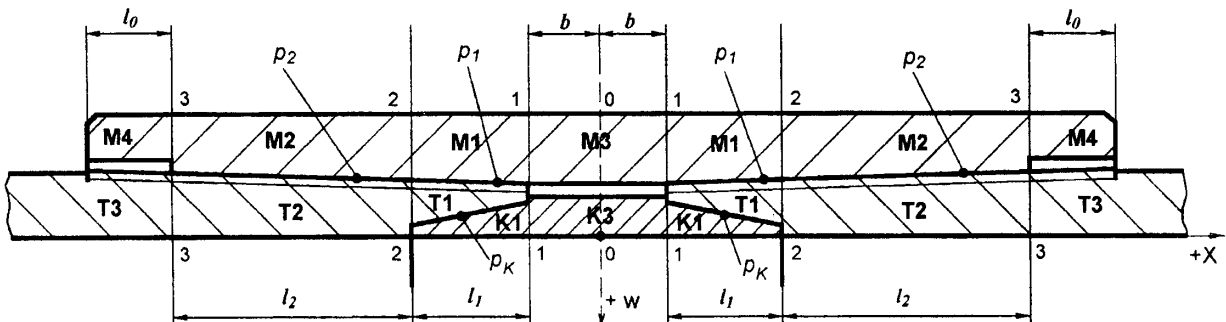
В процесі експлуатації обсадної колони у свердловині на елементи з'єднання діють експлуатаційні чинники (тиск, температура), які їх додатково деформують. Внаслідок цього радіуси муфти і труби змінюються, що у випадку їх

збільшення може призвести до зменшення натягу на ущільнюючих поверхнях втулки. Але під дією внутрішнього тиску і температури радіус герметизуючої втулки зростає, тим самим натяг в ущільненні збільшується, що підвищує герметизацію з'єднання.

Отже, з метою забезпечення гарантованого ущільнення на робочих поверхнях герметизуючої втулки в процесі експлуатації необхідно встановити деформації радіусів муфти, труби і втулки у з'єднанні та їх зміну під дією початкового натягу, внутрішнього тиску і температури.

1. Розрахункові моделі деформацій муфти і труби

На рис. 1 представлена схема для встановлення ділянок взаємодії муфти, труби і втулки після згвинчування. У з'єднанні внаслідок натягу Δ_3 на ділянці муфти M2 і труби T2 на кон-



1-1, 2-2, 3-3 — характерні перетини, які відтинають ділянки муфти M1...M4, труби T1...T3 і втулки K1, K3;

p_1, p_2, p_k — приведені тиски на ділянках взаємодії

Рисунок 1 — Схема ділянок взаємодії муфти, труби і герметизуючої втулки у з'єднанні

тактній різьбовій поверхні діє розподілений тиск p_2 [2, 3]. Хоча на ділянці муфти М1 і труби Т1 початковий натяг теж Δ_3 , але на їх різьбових поверхнях контактний тиск дещо інший: P_1 . Це зумовлено тим, що товщина цієї ділянки труби і відповідно її жорсткість є меншими, до того ж змінними по довжині. На ділянці труби Т1 і втулки К1 діє натяг Δ_k і розподілений тиск P_k .

Аналіз схеми на рис. 1 дає підстави зробити такі висновки:

– муфта, труба і втулка взаємодіють ділянками скінченної довжини з розподіленим контактним тиском, які впливають на їх результуючі деформації у з'єднанні;

– контактні ділянки мають такі характерні випадки розташування відносно неопертого (вільного) краю:

• далеко (на довгій відстані) від нього – ділянки М1;

• близько (на короткій відстані) від нього – ділянки М2;

• край навантаженої ділянки співпадає з ним – ділянки Т2 (умовно).

Для обсадних труб і муфт встановлено [2, 3], що їх деформації під дією тиску описуються моментною теорією тонкостінних кругових оболонок. Переміщення w серединної поверхні муфти чи труби під дією тиску P без крайового ефекту згину становить

$$w = \frac{p \cdot R^2}{E \cdot h} = \frac{p}{4 \cdot \beta^4 \cdot D}, \quad (2)$$

де: E – модуль пружності, МПа;

μ – коефіцієнт Пуассона;

h – товщина стінки, мм;

R – радіус серединної поверхні, мм;

β – коефіцієнт затухання деформацій;

1/мм;

D – коефіцієнт жорсткості стінки на згин,

Н/мм;

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

В [1] введено позначення J – коефіцієнта жорсткості оболонки на тиск

$$J = \frac{E \cdot h}{R^2} = 4 \cdot \beta^4 \cdot D \quad (4)$$

Встановлено [2, 3], що крайовий ефект (прогин оболонки) є значущим на відстані від навантаження l такої, що

$$l \cdot \beta \leq \pi. \quad (5)$$

Таку відстань чи ділянку класифікують як коротку. Якщо відстань від навантаження більша: $l > \pi/\beta$, то деформації (прогини) оболонки затухають настільки, що ними можна знехтувати, а таку ділянку чи відстань класифікують як довгу.

За умовою (5) для муфт обсадних труб діаметром 146 мм деформації затухають на відстані 74 мм, а для діаметра 168 мм – на відстані 78 мм від перетину 2 (рис. 1). Це дасть змогу оцінити значущість впливу кожної ділянки на сумарні деформації муфти. За конструкцією втулки відомо, що $l_1 = 30$ мм [1].

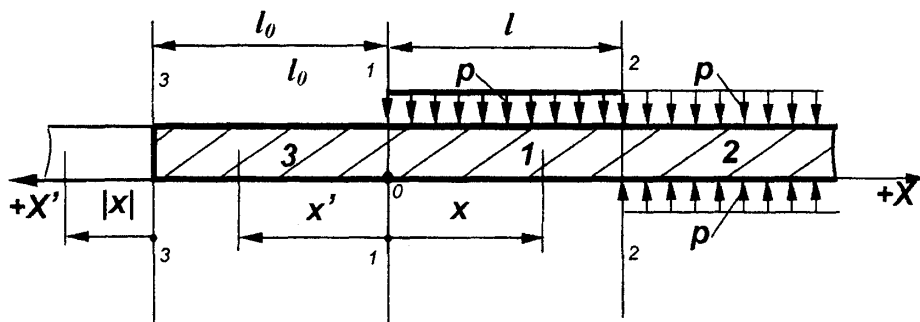
Для врахування впливу ділянки розподіленого тиску на будь-який переріз тонкостінної циліндричної оболонки введемо функцію $\lambda[y]$ з аргументом y таку, що

$$\lambda[y] = \frac{1}{2} \cdot (1 - e^{-\beta y} \cdot \cos \beta y), \quad (6)$$

де: β – коефіцієнт затухання деформацій за (3) для даної оболонки;

y – відстань від даного перерізу до краю ділянки з тиском, тому повинно бути завжди $y \geq 0$.

На рис. 2 подана розрахункова схема для визначення переміщень поверхні кругової оболонки від тиску p , для чого використано принцип накладання переміщень оболонки від кожної окремо ділянки з навантаженням [2, 3]. На рис. 2 в один бік (від перерізу 2 вправо) умовно прикладаємо ззовні і зсередини оболонки той самий тиск p , що не змінить її пружно-деформований стан. Після цього можна застосовувати формули, використані у [2, с.54] для труби, яка є довгою в два боки відносно краю тиску, розподіленого тільки в один бік. На рис. 2 це відповідає верхньому тиску з початком у перерізі 1 або нижньому тиску з початком у перерізі 2.



1-1, 2-2, 3-3 – характерні перетини, які відтинають ділянки того ж позначення;
 l_0 – відстань від краю тиску до вільного торця циліндра

Рисунок 2 – Розрахункова схема навантаження тонкостінного циліндра тиском p , розподіленим на короткій ділянці довжиною l .

Радіальні переміщення такої труби на ділянці із тиском на відстані x вправо від краю становлять [2]

$$w = \frac{P}{J} \cdot \frac{1}{2} (2 - e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x). \quad (7)$$

Радіальні переміщення такої труби на ділянці без тиску на відстані x' вліво від його краю становлять [2]

$$w' = \frac{P}{J} \cdot \frac{1}{2} e^{-\beta x'} \cdot \cos \beta x'. \quad (8)$$

Накладанням отримуємо результуючі переміщення труби на ділянці 1 аналогічно [3, с. 13]

$$w_1 = \frac{P}{J} (\lambda [x] + \lambda [l - x]) = \frac{P}{2J} \times (2 - e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x - e^{-\beta(l-x)} \cdot \cos \beta(l-x)) \quad (9)$$

Результуючі переміщення труби для ділянки 2

$$w_2 = \frac{P}{J} (\lambda [x] - \lambda [x - l]) = \frac{P}{2J} \times (e^{-\beta(x-l)} \cdot \cos \beta(x-l) - e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x) \quad (10)$$

Якщо відстань l_0 до неопертого (вільного) торця труби є довгою, то результуючі переміщення труби для довгої ділянки 3

$$w_3 = \frac{P}{J} (\lambda [x' + l] - \lambda [x']) = \frac{P}{2J} \times (e^{-\beta x'} \cdot \cos \beta x' - e^{-\beta(x'+l)} \cdot \cos \beta(x'+l)) \quad (11)$$

Аналіз формул (9), (10) і (11) дає підстави встановити правило аргументів функцій λ : першим аргументом є відстань до дальшого краю ділянки з тиском, другим – до ближчого краю.

Якщо відстань l_0 (рис. 2) є короткою, то радіальна податливість короткої ділянки 3 збільшується, що призводить до зростання переміщень труби на ділянці 1 під дією тиску p [3]. Встановлено [3, с. 31], що в такому випадку до переміщень ділянки 1 за (9) достатньо дзеркально додати переміщення відкинutoї ділянки труби зліва від перерізу 3 (рис. 2). За (11) знаходимо ці додаткові переміщення для ділянки 1

$$w'_3 = \frac{P}{J} (\lambda [x + l_0 + l] - \lambda [x + l_0]). \quad (12)$$

Для (12) можна застосувати правило аргументів функцій λ , якщо ділянку з тиском дзеркально відобразити, починаючи від вільного торця труби.

Якщо $l_0 = 0$, то результуючі переміщення на ділянці 1 з тиском p , коли один її край співпадає з вільним торцем труби,

$$w'_1 = \frac{P}{J} (\lambda [l + x] + \lambda [l - x]). \quad (13)$$

2 Деформації ділянок муфти і труби та їх взаємний вплив

Знайдемо результуючі переміщення середньої поверхні муфти і труби з врахуванням

впливу кожної ділянки окремо чи розташування вільного торця. Виберемо спільний початок координат в площині симетрії з'єднання – в перетині 0 (рис.1). Тоді можна задати координати характерних перерізів на рис.1 відносно нуля

$$X_1 = b; X_2 = b + l_1; X_3 = b + l_1 + l_2;$$

координата вільного торця муфти

$$X_4 = b + l_1 + l_2 + l_0 = L_M / 2.$$

Для позначення належності параметрів формул до певного елемента з'єднання надалі використаємо як індекси букви: М – муфта, Т – труба, К – конічна частина втулки; цифри – номер ділянки чи перетину.

Переміщення муфти w_{M1} на ділянці М1 включають 5 складових

$$w_{M1} = w_1 + w_{11} + w_{12} + w_{22} + w'_{12}, \quad (14)$$

де: w_1 – власні переміщення ділянки М1 від тиску p_1 за (9)

$$w_1 = \frac{P_1}{J} (\lambda [x - X_1] + \lambda [X_2 - x]); \quad (14.1)$$

w_{11} – вплив симетричної ділянки з тиском p_1 на М1 за (10)

$$w_{11} = \frac{P_1}{J} (\lambda [x + X_2] - \lambda [x + X_1]); \quad (14.2)$$

w_{12} – вплив суміжної ділянки М2 на М1 за (11)

$$w_{12} = \frac{P_2}{J} (\lambda [X_3 - x] - \lambda [X_2 - x]); \quad (14.3)$$

w_{22} – вплив симетричної ділянки з тиском p_2 на М1 за (10)

$$w_{22} = \frac{P_2}{J} (\lambda [x + X_3] - \lambda [x + X_2]); \quad (14.4)$$

w'_{12} – вплив на М1 короткої відстані від М2 до торця муфти за (12)

$$w'_{12} = \frac{P_2}{J} (\lambda [X_4 - x + l_2] - \lambda [X_4 - x]). \quad (14.5)$$

Підставивши (14.1)-(14.5) у (14), знайдемо переміщення муфти на ділянці М1

$$w_{M1} = \frac{P_1}{J_M} \cdot F_{M11} + \frac{P_2}{J_M} \cdot F_{M12}, \quad (15)$$

де: F_{M11} – функція впливу ділянок муфти з тиском p_1 на М1

$$F_{M11} = \lambda [x - X_1] - \lambda [x + X_1] + \lambda [X_2 - x] + \lambda [X_2 + x], \quad (15.1)$$

F_{M12} – функція впливу ділянок з тиском p_2 на М1

$$F_{M12} = \lambda [X_3 - x] + \lambda [X_3 + x] - \lambda [X_2 - x] - \lambda [X_2 + x] + \lambda [X_4 - x + l_2] - \lambda [X_4 - x]. \quad (15.2)$$

Переміщення муфти w_{M2} на ділянці М2 (рис.1) теж мають 5 складових

$$w_{M2} = w_2 + w_{21} + w_{11} + w'_{22} + w'_{21}, \quad (16)$$

де w_2 – власні переміщення M2 від тиску p_2 за (9)

$$w_2 = \frac{P_2}{J} (\lambda[x - X_2] + \lambda[X_3 - x]); \quad (16.1)$$

w_{21} – вплив суміжної ділянки M1 на M2 за (10)

$$w_{21} = \frac{P_1}{J} (\lambda[x - X_1] - \lambda[x - X_2]); \quad (16.2)$$

w_{11} – вплив симетричної ділянки з тиском p_1 на M2 за (10)

$$w_{11} = \frac{P_1}{J} (\lambda[x + X_2] - \lambda[x + X_1]); \quad (16.3)$$

w'_{22} – вплив короткої відстані від M2 до торця муфти за (12)

$$w'_{22} = \frac{P_2}{J} (\lambda[X_4 - x + l_2] - \lambda[X_4 - x]), \quad (16.4)$$

w'_{21} – вплив на M2 короткої відстані від M1 до торця муфти за (12)

$$w'_{21} = \frac{P_1}{J} (\lambda[X_4 - x + l_1 + l_2] - \lambda[X_4 - x + l_2]). \quad (16.5)$$

Підставивши (16.1)-(16.5) у (16), знайдемо переміщення муфти w_{M2} на ділянці M2

$$w_{M2} = \frac{P_2}{J_M} \cdot F_{M2} + \frac{P_1}{J_M} \cdot F_{M21}, \quad (17)$$

де: F_{M22} – функція впливу ділянок муфти з тиском p_2 на M2

$$F_{M22} = \lambda[x - X_2] + \lambda[X_3 - x] + \lambda[X_4 - x + l_2] - \lambda[X_4 - x]; \quad (17.1)$$

F_{M21} – функція впливу ділянок з тиском p_1 на M2

$$F_{M21} = \lambda[x - X_1] - \lambda[x + X_1] - \lambda[x - X_2] + \lambda[x + X_2] + \lambda[X_4 - x + l_1 + l_2] - \lambda[X_4 - x + l_2] \quad (17.2)$$

Аналогічно за (10) і правилом аргументів функцій λ можна вивести функцій впливу та знайти переміщення w_{M3} на ділянці M3 муфти

$$w_{M3} = \frac{P_1}{J_M} \cdot F_{M31} + \frac{P_2}{J_M} \cdot F_{M32} + \frac{P_z}{J_M}, \quad (18)$$

де: F_{M31} – функція впливу двох ділянок з тиском p_1 на M3

$$F_{M31} = \lambda[X_2 + x] + \lambda[X_2 - x] - \lambda[X_1 + x] - \lambda[X_1 - x]; \quad (18.1)$$

F_{M32} – функція впливу двох ділянок з тиском p_2 на M3

$$F_{M32} = \lambda[X_3 + x] + \lambda[X_3 - x] - \lambda[X_2 + x] - \lambda[X_2 - x]. \quad (18.2)$$

p_z – зовнішній тиск.

Ділянка T2 труби (рис. 1) стикується з ділянкою T1, яка конструктивно має відчутно менші товщину та жорсткості (3) і (4), які до того ж є значущими змінними вздовж ділянки. Тому взаємний вплив T1 і T2 не можна описати за (8). Для цього використаємо методику [1], за якою взаємодія здійснюється через перерізуючу силу Q_{T2} і згинальний момент M_{T2} , однакові в перетині 2 для ділянок T1 і T2. Отже, край T2 в перетині 2 розглядаємо як вільний, а вплив T1 на T2 через Q_{T2} і M_{T2} враховуємо додатковими переміщеннями T2 за формулою [2, с.52]. Тоді результуючі переміщення w_{T2} труби на ділянці T2 становлять

$$w_{T2} = \frac{P_2}{J_T} \cdot F_{T22} + \frac{1}{J_T} \cdot \Phi_{T21}, \quad (19)$$

де: F_{T22} – функція впливу краю труби на переміщення T2 під тиском P_2 за (13)

$$F_{T22} = \lambda[x - X_2 + l_2] + \lambda[X_3 - x]; \quad (19.1)$$

Φ_{T21} – функція впливу ділянки T1 на переміщення T2 за [2]

$$\Phi_{T21} = 2\beta \cdot e^{-\beta x'} \cdot \{\beta \cdot M_{T2} \times (\sin \beta x' - \cos \beta x') + Q_{T2} \cdot \cos \beta x'\}; \quad (19.2)$$

x' – відстань до торця 2 труби: $x' = x - X_2$.

3 Баланс деформацій і натягів у з'єднаннях муфти, труби і втулки

Радіальним натягом Δ позначаємо геометричну різницю радіусів внутрішньої і зовнішньої поверхонь перед їх з'єднанням. Після з'єднання утворюється посадка з натягом, в якій встановлюється баланс переміщень і натягу за (1) і (2). Введемо позначення S – коефіцієнта податливості (пружності) циліндричної оболонки

$$S = \frac{1}{J} = \frac{R^2}{Eh}, \quad (20)$$

тоді переміщення під тиском p будуть $w = p \cdot S$.

Взаємодія муфти і труби на ділянці 2 (рис. 1). Початковий радіальний натяг Δ_3 у з'єднанні встановлено стандартами. Але внутрішній тиск p_v збільшує радіус труби на $p_v \cdot S_{T2}$, а зовнішній тиск p_z зменшує радіус муфти на $p_z \cdot S_{M2}$, що збільшує натяг в посадці. Тому баланс переміщень і натягів на ділянці 2 буде

$$w_{M2} + w_{T2} = \Delta_3 + p_z \cdot S_{M2} + p_v \cdot S_{T2}, \quad (21)$$

де w_{M2} і w_{T2} – переміщення муфти і труби відповідно за (17) і (19).

Взаємодія муфти і труби на ділянці 1 (рис. 1). Тут початковий геометричний натяг той самий Δ_3 . Зовнішній тиск p_z зменшує ра-

дію муфти на $p_2 \cdot S_{M1}$. На трубу зсередини діє втулка з контактним тиском p_K , який збільшує радіус труби на $p_K \cdot S_{T1}$. Ділянка T1 труби з'єднана з ділянкою T2 в перетині 2, де діють сила Q_{T2} і момент M_{T2} (п.2). Останні викликають додаткове переміщення (вигин) w_{T0} конічної ділянки T1 труби, яке можна розрахувати за методикою [1]. Тому баланс переміщень і натягу тут буде

$$w_{M1} + w_{T1} = \Delta_3 + p_3 \cdot S_{M1} + p_K \cdot S_{T1} - w_{T0}, \quad (22)$$

де w_{M1} – переміщення муфти за (15); w_{T1} – переміщення труби під дією тиску p_1

$$w_{T1} = \frac{p_1 \cdot R_{T1}^2}{E_T h_{T1}} = p_1 \cdot S_{T1}. \quad (22.1)$$

Взаємодія труби і конічної частини втулки на ділянці 1 (рис.1). Початковий натяг Δ_K в ущільненні забезпечують конструктивно [1]. Під дією контактної тиску p_1 з боку муфти радіус труби зменшується на $p_v \cdot S_{K1}$. В перетині 1 втулки, де конус переходить в циліндричну частину (рис.1), діють перерізуюча сила Q_{K1} і згинальний момент M_{K1} . Вони викликають вигин конуса і збільшення його радіуса на величину – w_{K0} , яку можна розрахувати за методикою [1]. Якщо коефіцієнт теплового розширення труби α_T і втулки α_K різні, то підвищення температури з'єднання у свердловині на $T(^{\circ}\text{C})$ збільшує радіус конуса на $(\alpha_K - \alpha_T) \cdot T \cdot R_{K1}$. Тому баланс переміщень і натягу в ущільненні буде

$$w'_{T1} + w_{K1} = \Delta_K + p_1 \cdot S_{T1} + w_{T0} + p_v \cdot S_{K1} - w_{K0} + (\alpha_K - \alpha_T) \cdot T \cdot R_{K1}, \quad (23)$$

де w'_{T1} і w_{K1} – відповідно переміщення труби і конуса втулки від тиску p_K в ущільненні

$$w'_{T1} = \frac{p_K \cdot R_{T1}^2}{E_T \cdot h_{T1}} = p_K \cdot S_{T1}; \quad (23.1)$$

$$w_{K1} = \frac{p_K \cdot R_{K1}^2}{E_K \cdot h_{K1}} = p_K \cdot S_{K1}.$$

Таким чином, виведені тут рівняння (21), (22), і (23) описують взаємодію муфти, труби і втулки через контактний тиск та відповідні переміщення кожного елемента. Із цієї системи рівнянь можна визначити необхідні значення p_1 , p_2 і p_K в кожному характерному перетині з'єднання, бо коефіцієнти жорсткості (чи податливості) кожного елемента та функцій впливу ділянок визначені конструкцією муфти, труби і втулки. При цьому рівняння містять складові переміщень, які враховують вплив експлуатаційних чинників (тисків, температури) на деформації кожного елемента у з'єднанні.

Проте рівняння (21)-(23) містять складові, які описують деформації конічних кінців труби і втулки за методикою [1]. Це зумовлено тим, що саме їх з'єднання повинно забезпечувати герметизацію обсадної колони, а їх змінна товщина стінки має вирішальний вплив на утворення натягу в ущільненні. Тому треба встановити крайові умови навантажень і деформацій цих елементів у з'єднанні та скласти за ними додаткову систему рівнянь за методикою [1]. Це дасть змогу вибрати такі натяги в посадках, які забезпечують гарантоване ущільнення на втулці та герметизацію муфтових з'єднань обсадних труб.

Висновки

1. У муфтовому з'єднанні обсадних труб з герметизуючою втулкою деталі взаємодіють між собою ділянками з певним контактним тиском, кожна з яких перебуває у моментному пружно-деформованому стані.

2. Для опису цього стану за моментною теорією тонкостінних циліндрів виведено функції впливу на їх деформації обмежених ділянок з розподіленим тиском та правила їх застосування, за допомогою яких визначено деформації ділянок муфти, труби і втулки у з'єднанні.

3. Для цих ділянок складені рівняння балансу натягу і деформацій елементів під дією контактної, зовнішньої чи внутрішньої тисків і температури. Ця система рівнянь однозначно описує пружно-деформований стан муфтового з'єднання обсадних труб з герметизуючою втулкою залежно від їх конструкції, заданих натягів, експлуатаційних тисків і температури.

Література

1. 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.
2. Мочернюк Д.Ю. Исследование и расчет резьбовых соединений труб, применяемых в нефтедобывающей промышленности. – М: Недра, 1970. – 136 с.
3. Билык С.Ф. Герметичность и прочность конических резьбовых соединений труб нефтяного сортамента. – М.: Недра, 1981. – 362 с.