

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНОГО ТИСКУ У З'ЄДНАННІ ОБСАДНИХ ТРУБ І МУФТ З ГЕРМЕТИЗУЮЧОЮ ВТУЛКОЮ

Т.М.Кулинин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42453,  
e-mail: public@iung.edu.ua

Участки соединения с натягом обсадной трубы, муфты и герметизирующей втулки получают осесимметричные изгибы стенок, которые не затухают на коротких участках. Эти изгибы определяют максимальный прогиб каждого из двух краев участка, пропорциональный разнице радиусов, распределенных давлений и жесткостей со смежным участком-опорой. Предложены функции, позволяющие рассчитать результирующий изгиб участка по двух краевых прогибах с учетом влияния дополнительных изгибов смежных и несмежных участков.

The sections of the casing pipes, couplings and of the hermetically sealed spigot get the axis-symmetrical curves of their walls by the screw with the strain. These walls curves are proportional to the difference of the radiuses, spreaded pressures, toughnesses at the adjacent prop-sections and do not die out lengthwise the short sections. The proposed function gives the possibility to calculate the result curves of the thinwalled cylinder after the maximum turn both of its edges considering the influences of the additional curves from the adjacent and unadjacent sections.

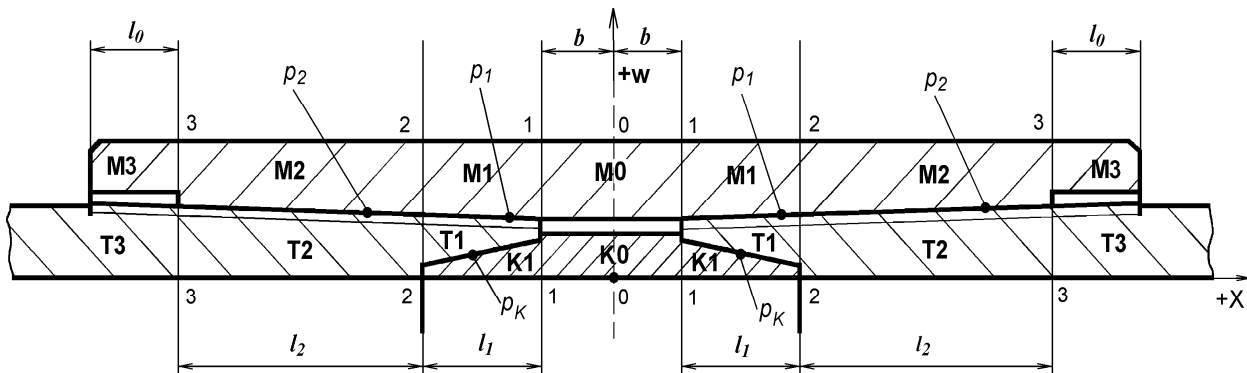
Метою цієї статті є розвиток і практичне застосування методики аналітичного визначення пружної взаємодії обсадних труб і муфт у з'єднаннях з натягом, розробленої у [1,2]. Стінки елементів цих з'єднань отримують радіальні деформації під дією контактної та експлуатаційної тисків, а також крайові вигини від впливу інших ділянок з'єднання, які можна описати за моментною теорією тонкостінних циліндрів.

Для герметизації різбових з'єднань обсадних труб і муфт автором [3] запропоновано застосувати вставну втулку із конічними ущільнюючими поверхнями, які з натягом взаємодіють із відповідно розточеними отворами труб (рис.1). Для забезпечення внутрішнього проходу обсадної колони така втулка конструктивно виконана тонкостінною, що дає змогу застосувати розроблену методику для розрахунку її взаємодії зі стінками труби і муфти.

При згвинчуванні з'єднання завдяки конусності поверхонь і натягу втулка пружно стискається в радіальному напрямі, на ущільнюючих поверхнях виникає контактний тиск, чим забезпечується герметичність. У з'єднанні об-

садних труб і муфт з герметизуючою втулкою можна виділити 5 ділянок взаємодії та 4 крайові перетини їх обпирання, показаних на рис. 1. Внаслідок радіального натягу  $\Delta$  у різьбі при згвинчуванні радіус муфти збільшується, а труби – зменшується. Внаслідок радіального натягу  $\Delta_1$  на герметизуючих поверхнях радіус втулки зменшується, а труби – повинен збільшуватись. Умови обпирання ділянок муфти, труби і втулки в крайових перетинах 1-1, 2-2, 3-3 і 4-4 різні, що спричинює різну величину вигинів країв їх стінок кожної ділянки. Оскільки їх довжини конструктивно менша половини довжини згвинчування, то крайові вигини не згасають на довжині ділянки, і тому має місце значний взаємний вплив радіальних деформацій стінок не тільки суміжних, але і несуміжних ділянок елементів з'єднання.

Таким чином, поставлено задачу аналітичного визначення сумарних прогинів стінок у новій конструкції з'єднання муфти, труби і герметизуючої втулки на усіх ділянках (рис. 1) з врахуванням їх взаємного обпирання та впливу.



1-1, 2-2, 3-3 – крайові перетини ділянок муфти M0...M3, труби T1...T3 і втулки K0, K1;  
 $p_1, p_2, p_K$  – контактні тиски на ділянках взаємодії

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

## 1 Визначення радіальних деформацій стінок муфти, труби і втулки у з'єднанні

Відомо [1,2], що під дією розподілених тисків будь-яка ділянка  $i$  змінює радіус на величину  $u_i$  (без врахування її обпирання на суміжні ділянки)

$$u_i = (P_{vi} - P_{zi}) \cdot G_i = P_{vi} \cdot G_i - P_{zi} \cdot G_i, \quad (1)$$

де:  $P_{zi}$  – зовнішній тиск (зменшує радіус стінки);  $P_{vi}$  – внутрішній тиск (збільшує її радіус);  $G_i$  – радіальна податливість стінки [1, 2]

$$G_i = \frac{1}{4\beta_i^4 D_i}, \quad (2)$$

де:  $D_i$  – циліндрична жорсткість стінки;  $\beta_i$  – коефіцієнт згасання крайових деформацій.

Із (1) випливає, що між даною та суміжною ділянкою-опорою виникає різниця радіусів стінок, яка зумовлена різницею тисків (чи їх відсутністю) або різницею жорсткостей стінок у перетині їх взаємного обпирання.

Як встановлено у [1, 2], у випадку різниці радіусів (натягу) двох суміжно опертих ділянок труби крайові вигини їх стінок направлені назустріч одна одній, а по величині розподіляються пропорційно їх податливості (2). Введемо позначення коефіцієнта пропорційності  $Z$  прогинів стінок за жорсткістю

$$Z_{ij} = \frac{J_j}{J_i + J_j}, \quad Z_{ji} = \frac{J_i}{J_i + J_j}, \quad (3)$$

де індекси  $i$  та  $j$  – номери суміжно опертих ділянок, з яких другий індекс – номер ділянки-опори;  $J_j$  – опорна жорсткість краю стінки [1, 2]

$$J_j = 4 \cdot \beta_j^3 \cdot D_j = \frac{1}{G_j \cdot \beta_j}. \quad (4)$$

Розглянемо умови навантаження та обпирання кожної ділянки муфти, труби і втулки зокрема. У досліджуваному з'єднанні (рис. 1) взаємодіють 3 елементи, виділено 5 характерних ділянок і 4 крайові перетини. Щоб встановити належність будь-якого параметра елемента, ділянці чи перетину, застосовано індекси із букви та двох цифр: буква індекса:  $m$  – муфта,  $t$  – труба,  $k$  – втулка; перша цифра індекса – номер ділянки; друга цифра – номер перетину.

На ділянках  $M0$  і  $M3$  муфти (див. рис. 1) ззовні діє тиск  $P_z$ , який зрівноважений таким же тиском зсередини (всередині муфти – внаслідок негерметичності гвинтових каналів різьби). Тому вигини  $M0$  і  $M3$  спричинені тільки їх взаємодією з іншими ділянками через суміжні перетини стінок.

На ділянках  $M1$  і  $M2$  із податливістю відповідно  $G_{m1}$  і  $G_{m2}$  на муфту діють зовнішній тиск  $P_z$  та відповідно внутрішні  $P_1$  і  $P_2$  (контактні у різьбі), які викликають зміну їх радіусів згідно із (1)

$$u_{m1} = (P_1 - P_z) \cdot G_{m1}, \quad u_{m2} = (P_2 - P_z) \cdot G_{m2}. \quad (5)$$

За методикою [1] знаходимо складові вигинів країв ділянки  $M1$  муфти (рис. 1). У перетині 1-1 вона опирається на ділянку  $M0$ , що внаслідок різниці радіусів дає вигин її стінки [1, формула (17)]

$$w_{m10} = -u_{m1} \cdot Z_{m10} \cdot \theta[\beta_{m1} \cdot (x - X_1)], \quad (6)$$

де  $(x - X_1)$  – відстань від перетину обпирання 1-1 до перетину з координатою  $x$ .

З іншого боку у перетині 2-2 обпирання на ділянку  $M2$  внаслідок різниці радіусів дає такий вигин стінки ділянки  $M1$  [1, формула (25)]

$$w_{m12} = 0,5 \cdot (u_{m2} - u_{m1}) \cdot \theta[\beta_{m1} \cdot (X_2 - x)], \quad (7)$$

де  $(X_2 - x)$  – відстань від перетину 2-2 до того ж самого  $x$ ; а  $Z_{m12} = 0,5$  за (3), тому що  $J_{m12} = J_{m21}$  у перетині 2-2.

Симетрична ділянка  $M1'$  (рис. 1) впливає на  $M1$ , тому що її прогин від натягу в перетині 1'-1' на довжині  $2b$  ділянки  $M0$  не затухає, бо функція згасання  $\theta[\beta_{m0} \cdot 2b] > 0,175$ . Це викликає на ділянці  $M1$  додатковий вигин згідно із [1, формула (35-36)]

$$w_{m11} = u_{m1} \cdot Z_{m01} \cdot \theta[\beta_{m0} \cdot 2b] \cdot \theta[\beta_{m1} \cdot (x - X_1)]. \quad (8)$$

Ділянка  $M3$  теж впливає на  $M1$ , бо прогин від натягу в перетині 3-3 на довжині  $l_2$  ділянки  $M2$  затухає недостатньо (коефіцієнт  $\theta[\beta_{m2} \cdot l_2] > 0,05$ ), що викликає на ділянці  $M1$  додатковий вигин за [1, формула (31)]

$$w_{m13} = -u_{m2} \cdot Z_{m23} \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot l_2] \cdot \theta[\beta_{m1} \cdot (X_2 - x)]. \quad (9)$$

Результуючі прогини стінки муфти на ділянці  $M1$  складаються із суми натягу  $u_{m1}$  (5) та вигинів (6-9)

$$W_{m1} = u_{m1} + w_{m10} + w_{m11} + w_{m12} + w_{m13}. \quad (10)$$

Тепер за методикою [1] знаходимо складові вигинів другої ділянки  $M2$  муфти (рис. 1). Вона опирається на ділянку  $M1$  у перетині 2-2, що дає вигин її стінки за [1, формули (23-24)]

$$w_{m21} = 0,5 \cdot (u_{m1} - u_{m2}) \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot (x - X_2)], \quad (11)$$

де  $(x - X_2)$  – відстань від перетину  $x$  вже на ділянці  $M2$  до перетину обпирання 2-2; а  $Z_{m21} = 0,5$  за (3), тому що  $J_{m21} = J_{m12}$  у перетині 2-2.

З іншого боку ділянка  $M2$  опирається на ділянку  $M3$  в перетині 3-3, що дає вигин її стінки за [1, формула (17)]

$$w_{m23} = -u_{m2} \cdot Z_{m23} \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot (X_3 - x)], \quad (12)$$

де  $(X_3 - x)$  – відстань від перетину  $x$  до 3-3.

За рахунок вільного торця муфти в перетині 4-4 ділянка  $M3$  має меншу жорсткість, тому вигин на ділянці  $M2$  збільшується на величину, встановлену у [1, формула (38)],

$$w_{m24} = u_{m2} \cdot Z_{m32} \cdot \theta[\beta_{m3} \cdot l_3] \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot (X_3 - x)] + w_{m21} \cdot \theta[\beta_{m3} \cdot l_3] \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot l_2]. \quad (13)$$

Оскільки добуток

$$\theta[\beta_{m3} \cdot l_3] \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot l_2] < 0,025,$$

то другим доданком (13) можна знехтувати.

Вигин ділянки  $M1$  від натягу в перетині 1-1 на її довжині  $l_1$  не затухає, бо коефіцієнт  $\theta[\beta_{m1} \cdot l_1] > 0,08$ , а це на ділянці  $M2$  викликає додатковий вигин за [1, формула (35)]

$$w_{m20} = u_{m1} \cdot Z_{m10} \cdot \theta[\beta_{m1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{m2} \cdot (x - X_2)]. \quad (14)$$

Результуючі прогини стінки муфти на ділянці  $M2$  складаються із суми натягу  $u_{m2}$  (5) та вигинів (11-14)

$$W_{m2} = u_{m2} + w_{m20} + w_{m21} + w_{m23} + w_{m24}. \quad (15)$$

Далі за цією ж методикою [1] знаходимо прогини ділянок труби, викликані з'єднанням (див. рис. 1). На ділянці  $T1$  із податливістю  $G_{t1}$  діють тиски зовнішній  $P_1$  (контактний в різьбі) та внутрішній  $P_k$  (контактний в ущільненні), що викликає зміну радіуса згідно із (1)

$$u_{t1} = (P_k - P_1) \cdot G_{t1}. \quad (16)$$

На ділянці  $T2$  труби із податливістю  $G_{t2}$  діють зовнішній тиск  $P_2$  (в різьбі) та внутрішній  $P_v$ , що викликає зміну радіуса її стінки

$$u_{t2} = (P_v - P_2) \cdot G_{t2}. \quad (17)$$

На стінки ділянок  $T3$  і  $T4$  із податливістю відповідно  $G_{t3}$  і  $G_{t4}$  діють тиски зовнішній  $P_z$  і внутрішній  $P_v$ , що викликає зміну їх радіусів

$$u_{t3} = (P_v - P_z) \cdot G_{t3}, \quad u_{t4} = (P_v - P_z) \cdot G_{t4}. \quad (18)$$

Розглядаємо ділянку  $T1$  труби. Її обпирання у перетині 2-2 на ділянку  $T2$  дає вигин стінки за [1, формули (21-22)]

$$w_{t12} = (u_{t2} - u_{t1}) \cdot Z_{t12} \cdot \theta[\beta_{t2} (X_2 - x)]. \quad (19)$$

Вигин ділянки  $T2$  від різниці радіусів в перетині 3-3 на довжині  $l_2$  затухає з коефіцієнтом  $\theta[\beta_{t2} l_2]$ , а це на ділянці  $T1$  труби викликає додатковий вигин за [1, формула (28)]

$$w_{t13} = (u_{t3} - u_{t2}) \cdot Z_{t23} \cdot \theta[\beta_{t2} \cdot l_2] \cdot \theta[\beta_{t1} (X_2 - x)]. \quad (20)$$

Ділянка  $T1$  має вільний торець в перетині 1-1 (рис. 1), за рахунок якого її жорсткість послаблена. Тому її вигини збільшуються за [1, формула (39)] на величину

$$w_{t11} = u_{t1} \cdot \theta[\beta_{t1} (x - X_1)] + (u_{t2} - u_{t1}) \cdot Z_{t12} \cdot \theta[\beta_{t1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{t1} (x - X_1)]. \quad (21)$$

Результуючі прогини стінки труби на ділянці  $T1$  складаються із суми натягу  $u_{t1}$  (16) та вигинів (18-21)

$$W_{t1} = u_{t1} + w_{t11} + w_{t12} + w_{t13}. \quad (22)$$

Тепер знаходимо складові вигинів другої ділянки  $T2$  труби (рис. 1). Вона опирається на ділянку  $T1$  в перетині 2-2, що дає вигин стінки за [1, формули (23-24)]

$$w_{t22} = (u_{t1} - u_{t2}) \cdot Z_{t21} \cdot \theta[\beta_{t2} (x - X_2)]. \quad (23)$$

Так само обпирання на ділянку  $T3$  в перетині 3-3 дає на ділянці  $T2$  вигин стінки труби

$$w_{t23} = (u_{t3} - u_{t2}) \cdot Z_{t23} \cdot \theta[\beta_{t2} (X_3 - x)]. \quad (24)$$

Вигин ділянки  $T3$  від різниці радіусів у перетині 4-4 на довжині  $l_3$  не затухає, коефіцієнт  $\theta[\beta_{t3} \cdot l_3] > 0,15$ , тому це на ділянці  $T2$  викликає додатковий вигин

$$w_{t24} = (u_{t4} - u_{t3}) \cdot Z_{t34} \cdot \theta[\beta_{t3} \cdot l_3] \cdot \theta[\beta_{t2} (X_3 - x)]. \quad (25)$$

Вигин від вільного торця в перетині 1-1 ділянки  $T1$  на довжині  $l_1$  затухає з коефіцієнтом  $\theta[\beta_{t1} \cdot l_1]$ , що викликає на ділянці  $T2$  додатковий вигин за [1, формула (41)]

$$w_{t21} = u_{t1} \cdot \theta[\beta_{t1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{t2} (x - X_2)]. \quad (26)$$

Результуючі прогини стінки труби на ділянці  $T2$  складаються із суми натягу  $u_{t2}$  (17) та вигинів (23-26)

$$W_{t2} = u_{t2} + w_{t21} + w_{t22} + w_{t23} + w_{t24}. \quad (27)$$

Тепер за цією ж методикою [1] знаходимо прогини ділянок герметизуючої втулки у з'єднанні (див. рис. 1). На ділянці  $K1$  втулки з податливістю  $G_{k1}$  діють тиски зовнішній  $P_k$  (контактний в ущільненні) і внутрішній  $P_v$ , що викликає зміну радіуса

$$u_{k1} = (P_v - P_k) \cdot G_{k1}. \quad (28)$$

На ділянці  $K0$  втулки з податливістю  $G_{k0}$  діють тиски зовнішній  $P_z$  (всередині муфти – внаслідок негерметичності гвинтових каналів різьби) і внутрішній  $P_v$ , що викликає зміну радіуса за (1)

$$u_{k0} = (P_v - P_z) \cdot G_{k0}. \quad (29)$$

Таким чином, у симетричних перетинах 1-1 і 1'-1' втулки має місце натяг стінок, рівний різниці їх радіусів ( $u_{k1} - u_{k0}$ ). В перетинах 2-2 і 2'-2' жорсткість втулки послаблена за рахунок вільних торців.

Сумарні вигини ділянки  $K1$  втулки з вільним торцем запишемо, використовуючи [1, формула (39)] і враховуючи при цьому те, що вісь  $x$  направлена протилежно від середини ділянки  $K0$

$$w_{k1} = w_{k11} \cdot \theta[\beta_{k1} (x - X_1)] + (u_{k1} + w_{k11} \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot l_1]) \cdot \theta[\beta_{k1} (X_2 - x)], \quad (30)$$

де  $w_{k11}$  – максимальний вигин ділянки  $K1$  в перетині 1-1; а сума  $(u_{k1} + w_{k11} \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot l_1])$  – максимальний вигин ділянки  $K1$  у перетині 2-2 із врахуванням зменшеної жорсткості вільного торця за [1, формули (38-39)].

Цей вигин  $w_{k11}$  у перетині 1-1 втулки виникає від: а) обпирання ділянки  $K1$  на ділянку  $K0$  за [1, формули (21-22)]; б) незатухання на довжині  $2b$  вигину ділянки  $K0$  від перетину 1'-1'; в) незатухання на довжині  $l_1$  і  $2b$  вигину вільного торця в симетричному перетині 2'-2'. У результаті це дає в перетині 2-2

$$w_{k11} = (u_{k0} - u_{k1}) \cdot Z_{k10} + (u_{k1} - u_{k0}) \cdot Z_{k01} \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b] + (u_{k1} + w_{k11} \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot l_1]) \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b] = (u_{k0} - u_{k1}) \cdot (Z_{k10} - Z_{k01} \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b]) + u_{k1} \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b], \quad (31)$$

де опущено доданок із  $(\theta[\beta_{k1} \cdot l_1])^2 \theta[\beta_{k0} \cdot 2b] \approx 0$ .

Підставимо (31) в (30) і після зведення знаходимо результуючі вигини стінки ділянки  $KI$  втулки у вигляді

$$w_{k1} = (u_{k0} - u_{k1}) \cdot (Z_{k10} - Z_{k01} \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b]) \times \\ \times (\theta[\beta_{k1} \cdot (x - X_1)] + \theta[\beta_{k1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{k1} \cdot (X_2 - x)]) + \\ + u_{k1} \cdot (\theta[\beta_{k1} \cdot (X_2 - x)] + \theta[\beta_{k1} \cdot l_1] \cdot \theta[\beta_{k0} \cdot 2b]) \times \\ \times \theta[\beta_{k1} \cdot (x - X_1)]. \quad (32)$$

Остаточні прогини стінки втулки на ділянці  $KI$  складаються із суми натягу (28) і вигинів (32).

Конструкція з'єднання муфти, труби і втулки задана, тому для кожної  $j$ -тої ділянки відомі параметри  $\beta_j$  та довжина  $L_j$  і можна розрахувати параметри  $J_i$ ,  $Z_{i,j}$  та добуток функцій  $\theta[\beta_j L_j]$ . Якщо цей добуток менший за 0,05, то прийнято такі доданки не враховувати як несуттєві. Розрахунки показали, що для ділянок обсадних муфт і труб діаметрами 146 та 168 мм добуток переважно вже двох функцій  $\theta$  не більший за 0,05.

Аналіз остаточних прогинів стінок ділянок муфти (10,15), труби (22,27) і втулки (28,32) показує, що у їх доданках тиск входить в першій степені і, що важливо, незалежно від його природи: внутрішній чи зовнішній, експлуатаційний чи контактний. Треба вказати, що для кожної ділянки значення тиску береться в конкретному крайовому перетині опертя. Вигини  $w_{i,j}$  залежать від координати  $x$ , оскільки функції  $\theta[\beta \cdot (x - X_i)]$  залежать від  $x$ .

Власні прогини  $u_i$  за (1) змінюються по довжині ділянки залежно від координати  $x$  внаслідок зміни товщини і податливості стінки  $G_i$ , конструкція якої відома, або контактного тиску  $P_k$ , тому що експлуатаційні тиски у межах з'єднання можна вважати постійними.

З цього аналізу випливає висновок: прогини стінок ділянок з'єднання визначаються розподіленими тисками як на даній, так і на суміжних та несуміжних ділянках (при чому прогини лінійно залежать від тисків). Якщо це тиски експлуатаційні, то вони відомі. А якщо це контактні тиски, то вони залежать від натягу у з'єднанні і їх потрібно визначати. Лінійна залежність вигинів і тисків спрощує вирішення цієї задачі.

## 2 Методика визначення контактних тисків у з'єднанні муфти, труби і втулки

При машинному (силовому) згвинчуванні муфта і труба переміщуються в осьовому напрямі назустріч одна одній. За рахунок конусності радіус різьби труби виявляється більшим за внутрішній радіус муфти на величину радіального натягу  $\Delta$ , внаслідок якого виникають пружні деформації стінок у з'єднанні: радіус муфти збільшується, а труби – зменшується.

Оскільки висота профілю конічної різьби цих з'єднань значно менша товщини їх стінок, то гвинтову поверхню різьби приймають конічною, яка відповідає середньому діаметру різьби у з'єднанні, а контактний тиск, який виникає на поверхнях різьби, – розподіленим осесиметрично і неперервно по цій конічній поверхні.

У труби і герметизуючої втулки є конічні ущільнюючі поверхні, на яких при згвинчуванні за рахунок радіального натягу  $\Delta_1$  теж аналогічно виникає контактний тиск. Як у різьбі, так і в ущільненні контактний тиск для муфти є внутрішнім і збільшує її радіус, а для труби – зовнішнім і зменшує радіус.

Для визначення контактного тиску на ділянках 1 і 2 різьби і в ущільненні використаємо методику [2], за якою враховуються нерівномірні прогини стінок тонкостінних циліндрів у з'єднанні із натягом. Згідно із [2] в контактному перетині з'єднання з натягом  $\Delta$  виконується рівняння балансу натягу і прогинів

$$W_m - W_t = \Delta, \quad (33)$$

де  $W_m$  і  $W_t$  – сумарні переміщення стінок муфти і труби. Знак мінус означає, що переміщення внутрішнього циліндра у з'єднанні від'ємні (у бік зменшення радіуса).

Сумарні переміщення стінки кожної ділянки включають такі складові

$$W = u + w + w_0, \quad (34)$$

де:  $u$  – радіальні переміщення стінки під дією результуючого тиску;  $w$  – сумарні вигини стінки від опирання на крайові перетини суміжних та несуміжних ділянок циліндра з іншими параметрами жорсткості і навантаження;  $w_0$  – вигини стінки від дії осьового зусилля на обсадну колону

$$w_0 = w_q + w_e, \quad (35)$$

де:  $w_q$  – вигини стінки від радіальної складової розділеної осьової сили е гострокутній різьбі;  $w_e$  – вигини стінки від ексцентриситету прикладання осьового зусилля відносно різьби.

Переміщення стінок ділянок муфти, труби і втулки під дією внутрішнього і зовнішнього експлуатаційних тисків, контактного тиску в різьбі і в ущільненні та радіальної складової розподіленого осьового зусилля в різьбі визначаються для муфти за формулами (5), для труби за (16-17), для втулки за (28).

Вигини стінок муфти, труби і втулки від опирання на суміжні ділянки визначаються для муфти за формулами (10,15), для труби за (22,27), для втулки за (32). Як встановлено у [1,2], кожна складова крайового вигину ділянки містить радіальний натяг  $u_{ik}$  стінки  $i$ -тої ділянки в  $k$ -му перетині обпирання або різницю таких натягів  $(u_{ik} - u_{jk})$  двох суміжних ділянок  $i$  та  $j$  в перетині  $k$ . Будь-який натяг  $u_{ik}$  чи  $u_{jk}$  пропорційний результуючому тиску, складовою якого є контактний тиск, і податливості  $G_{ik}$  чи  $G_{jk}$  стінки в цьому перетині, яка визначається тільки її геометричними параметрами. Внутрішній  $P_v$  і зовнішній  $P_z$  експлуатаційні тиски відомі. Відомими також є розподілене осьове наванта-

ження  $q_0$  на ділянках різьби, яке залежить тільки від осевого зусилля  $Q$  на колоні і за яким можна розраховувати радіальну складову тиску.

Тому у формулах визначення крайових вигинів ділянок  $w_{ik}$  залишаються невідомими значення контактних тисків  $P_{ik}$  в  $k$ -му перетині з'єднання. Для з'єднання муфти, труби і герметизуючої втулки (рис. 1) такими перетинами є 1-1, 2-2 і 3-3. В перетині 1-1 невідомим є контактний тиск  $P_{11}$  в різьбі ділянки 1, а також контактний тиск  $P_{k1}$  в ущільненні між трубою і втулкою. В перетині 2-2 невідомими на ділянці 1 є контактні тиски  $P_{12}$  в різьбі та  $P_{k2}$  в ущільненні, а на ділянці 2 – контактний тиск  $P_{22}$  в різьбі. В перетині 3-3 – контактний тиск  $P_{23}$  в різьбі. Кожний із цих тисків у своєму перетині має протилежні знаки: для зовнішнього циліндра – додатний (збільшує радіус); для внутрішнього – від'ємний (зменшує радіус).

З другого боку, користуючись рівнянням (33) за методикою [2] для кожного з цих перетинів можна скласти рівняння балансу прогинів (переміщень) стінки і натягу. Таким чином, отримуємо систему із 6-ти рівнянь

$$\begin{cases} W_{m11} - W_{t11} = \Delta ; \\ W_{m12} - W_{t12} = \Delta ; \\ W_{22} - W_{t22} = \Delta ; \\ W_{23} - W_{t23} = \Delta ; \\ W_{t11} - W_{k1} = \Delta_1 ; \\ W_{t12} - W_{k2} = \Delta_1 . \end{cases} \quad (36)$$

Кожне із цих рівнянь системи (36) складе-не для відповідного перетину, тому містить один із шуканих контактних тисків. Але складові крайових вигинів  $w_{ik}$  враховують вплив також й інших перетинів, тому у кожному рівнянні є доданки з шуканими тисками цих інших перетинів. При цьому значення тисків входять у кожне рівняння в першій степені, тому система рівнянь (36) є системою 6-ти лінійних рівнянь відносно  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{22}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{k1}$  і  $P_{k2}$ . З огляду на велику кількість доданків  $w_{ij}$ , які роблять рівняння громіздкими, розрахунок матриць коефіцієнтів системи лінійних рівнянь, як і її розв'язок, виконано за допомогою середовища програмування Mathcad.

## Висновки

Стінки обсадної труби, муфти і герметизуючої втулки у з'єднанні з натягом отримують крайові вигини, які змінюють тиск на контактних поверхнях. Але ці вигини лінійно залежать як від експлуатаційних, так і від контактних тисків. Рівняння балансу вигинів і натягу теж лінійне, що дає можливість скласти систему лінійних рівнянь і визначити контактні тиски на кожній ділянці. У цих рівняннях для муфти, труби і втулки можна врахувати такі чинники: неоднакове температурне розширення через зміну натягу; радіальну складову розподіленого осевого навантаження через додатковий тиск у гострокутній різьбі; ексцентриситет прикладання осевої сили через додаткові вигини ділянок.

## Література

- 1 Кулинин Т.М., Палійчук І.І. Крайові вигини стінок муфт і труб, з'єднаних з натягом // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004.– № 2 (11). – С.28-34.
- 2 Палійчук І.І., Кулинин Т.М. Визначення контактних тисків у з'єднаннях муфт і труб з натягом // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004.– № 3 (12). – С.46-51.
- 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.